

REINALDO WELTI

LA EXPLICACIÓN DEL AZUL DEL CIELO

UNA AVENTURA DEL PENSAMIENTO



*Vesperi Refulgens*  
Editora



**Reinaldo Welti**

---

**La explicación del azul del cielo  
Una aventura del pensamiento**

# **La explicación del azul del cielo**

## **Una aventura del pensamiento**

**Primera edición: agosto de 2013, Rosario, Argentina**

*Vesperi Refulgens*  
**Editora**  
**Rosario, Argentina**

ISBN 978-987-29753-0-2



9 789872 975302

# Índice

<b>Prólogo.....</b>	<b>7</b>
<b>1. La luz y los colores. Desde los griegos al renacimiento.....</b>	<b>11</b>
<b>2. Los colores en el periodo de la revolución científica.....</b>	<b>28</b>
<b>3. La teoría ondulatoria de la luz.....</b>	<b>45</b>
<b>4. Los azules de Tyndall y Rayleigh.....</b>	<b>60</b>
<b>5. Los átomos, las fluctuaciones y el cielo azul.....</b>	<b>78</b>
<b>6. El brillo del cielo y la visión de los colores.....</b>	<b>105</b>
<b>7. Los otros colores del cielo.....</b>	<b>121</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>135</b>



## Prólogo

Hay en la ciencia preguntas que parecen de una sencillez poco común pero que, sin embargo, fueron capaces de mantener ocupadas a generaciones de estudiosos. “¿Por qué el cielo es azul?” es una de ellas. Esta pregunta desconcertó a Platón, a Leonardo y hasta a Newton, quien pudo dar respuesta a muchos secretos de nuestro universo, pero no a éste. Pasaron los siglos y la pregunta continuaba sin hallar una respuesta. En 1862, Herschel, astrónomo y fundador de la espectroscopía, calificaba al color del cielo y a la polarización de la luz solar como “*los dos grandes enigmas permanentes de la meteorología*”. Recién a partir del año 1871, Rayleigh, siguiendo una sugerencia de Maxwell, comenzó a resolver el enigma calculando la dispersión de la luz solar producida por las propias moléculas del aire. Esta idea era temeraria para la época, puesto que la existencia de los átomos y moléculas fue reconocida por la comunidad científica sólo después de los trabajos teóricos de Einstein en 1905 y de los trabajos experimentales de Perrin en 1909. La pretensión de explicar el azul del cielo conduce a una búsqueda hacia el interior de la materia, pues el cielo no podría ser azul si los átomos no fueran algo real.

Mi intención es que el contenido de este libro sea accesible para todos. A pesar de esto, hay ciertas secciones que pueden presentar alguna dificultad, en particular el capítulo 5, en el que se hace una breve introducción a la teoría de las fluctuaciones. Tomé la decisión de incluirla pues a través de la misma se pueden dilucidar, el movimiento browniano, la existencia de los átomos y la dispersión transversal de la luz del Sol por la atmósfera, que origina el color azul. Einstein, utilizando sus conocimientos de la matemática de las fluctuaciones, explicó teóricamente el movimiento browniano; el empeño por confirmar esta deducción, llevó a Perrin a realizar los experimentos que permitieron comprobar la existencia de los átomos. Para la explicación del color del

cielo, la fluctuación del número de moléculas contenidas en un volumen de la atmósfera juega un papel decisivo. Por otra parte, las mediciones de la transmisión de la luz a través de la atmósfera aportaron, al igual que el movimiento browniano, una de las pruebas decisivas de la existencia de los átomos y de la validez de la teoría cinética de los gases.

Iniciamos la aventura de la explicación del color del cielo con los intentos de los griegos para comprender la luz y los colores y concluimos comentando la justificación teórica de la opalescencia crítica que asume – recién a mediados del siglo XX - un punto de vista molecular.

El objetivo de este trabajo es exponer, no solo la historia que está detrás de los intentos para explicar el color del cielo y mostrar la sutileza de los fenómenos físicos involucrados sino, además, destacar algunos aspectos de la evolución de los conceptos básicos de la física relacionados con la naturaleza de la luz. En particular, la descripción contrapuesta de la refracción de la luz por parte de la teoría corpuscular de Descartes-Newton y de la teoría ondulatoria de Huygens y la importancia del experimento de Foucault que resuelve esta contradicción. Asimismo, examinamos la formulación de Young del principio de interferencia para la luz, que permite medir la longitud de onda de la luz mediante el experimento de la interferencia por dos ranuras y registrar los resultados del experimento conocido como los anillos de Newton. Subrayamos también el planteo de Fresnel acerca de la difracción de la luz, sustentado en las teorías de Huygens y Young, así como el fenómeno de la doble refracción a través del cristal de Islandia que obligó a cambiar el modelo ondulatorio fundado en las ondas sonoras longitudinales por otro que admitía que la luz era una onda transversal. Se analiza además, la teoría electromagnética de Maxwell, en la que se sugiere que la luz es una onda electromagnética con sus campos eléctricos y magnéticos perpendiculares a la dirección de propagación y el aparente triunfo de la teoría ondulatoria de la luz sobre la corpuscular, apoyada en los experimentos de Foucault y en la teoría electromagnética. Por último, se observa el resurgimiento, a comienzos del siglo XX, del problema de optar entre corpúsculos y ondas, esta vez, sin embargo, de una manera más intrincada y profunda.

Si bien la respuesta habitual a la pregunta “¿por qué el cielo es azul?” se basa casi únicamente en la dispersión de la luz por las moléculas de la atmósfera, haciendo sólo una mínima mención a la contribución de la teoría del color, en este libro intentamos

realizar un análisis más detallado de la visión de los colores pues ésta juega un papel importantísimo en la percepción del color del cielo.

Mi vinculación con el Instituto de Estudios Superiores “Olga Cossettini” de Rosario, me ha dado la oportunidad, desde hace varios años, de llevar a cabo un curso regular para profesores de física que incluye, además de las teorías sobre la luz, la interacción de la radiación con la materia. La evolución conceptual de estos temas, que se mezcla con la historia de la explicación del color del cielo, permite a los alumnos utilizar las ideas adquiridas en el curso para terminar de desarrollar los argumentos que en este libro solo se esbozan. Esto les permite, involucrarse en la evolución de las teorías que posibilitan explicar el color del cielo, obtener confianza en su capacidad para hacer uso de los conocimientos adquiridos y emprender otras actividades de investigación. Espero, también, que otros lectores encuentren en este libro estímulos para querer conocer un poco más acerca de esta bella ciencia que es la física.

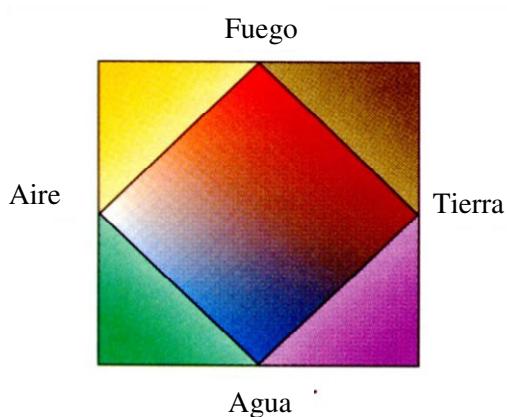
Finalmente, quiero hacer una mención especial al libro de Peter Pesic, *El cielo en una botella*, de la editorial Gedisa, edición 2007, en el que se exponen interesantes observaciones sobre la luz, el color, la visión y la atmósfera, además de intentar dar una respuesta a la pregunta de por qué el cielo es azul. Según creo, esta obra de Pesic es la única, hasta ahora, que trata el tema en español. Su lectura fue uno de los motivos que me llevó a escribir el presente libro; el otro motivo fue, como mencioné más arriba, la construcción de un relato que acompañara mi curso de ondas y óptica.



# 1

## Desde los griegos hasta el Renacimiento

El tema del color, convertido en teoría y lenguaje, ha suscitado el interés polémico de los grandes pensadores y filósofos de todos los tiempos. Los primeros escritos sobre el color se encuentran en los poemas de Alcmeón de Crotona, que datan del siglo V a.C. donde éste reflexiona en torno de la antítesis fundamental, la luz y la oscuridad, el blanco y el negro como el origen de los colores. Esta idea permaneció como una especulación de la filosofía natural durante mucho tiempo. Empédocles (484-424 a.C.) relacionaba los cuatro colores básicos: negro, blanco, rojo y ocre (color amarillo naranja de saturación moderada) - a los cuatro elementos: tierra, agua, aire y fuego. Su razonamiento era más o menos el siguiente: cuando un objeto se quema con una llama, libera su humedad, se siente el aire que viene de él, y las cenizas muestran la tierra que contenía.



**Figura 1.1.** Empédocles relacionaba los cuatro colores básicos: negro, blanco, rojo y ocre con los cuatro elementos: tierra, agua, aire y fuego.

La suposición de que toda la materia está formada por una combinación de sólo cuatro elementos ponía orden en el caos del mundo. Demócrito (460-370 a.C.), el creador de la teoría atómica griega, interpretaba a los colores como propiedades de las superficies de

los objetos y afirmaba que las superficies lisas parecían blancas, mientras que las superficies rugosas parecían negras.

Lucrecio (94-53 a.C.) en sus especulaciones acerca de la visión, retoma la teoría atómica de Demócrito. De acuerdo con esta teoría el mundo se compone de átomos, que son partes indivisibles de la materia y están en movimiento perpetuo. Cuando un cuerpo muere sus átomos se combinan con otros para formar nuevos cuerpos. Los atomistas formularon una teoría de la visión que, al igual que el tacto, se logra mediante la acción directa de un cuerpo sobre otro. Suponían que una réplica exacta de un objeto, constituida materialmente por átomos, se emite desde la superficie del objeto y se propaga a través del espacio hacia el observador. La existencia de estos *simulacros* o copias, se apoyaba en la observación de la naturaleza, por ejemplo en las mudas de la piel que se da en algunos animales. Esto es lo que Lucrecio señalaba: “[...] *de todos los objetos existe lo que llamamos sus simulacros, especies de membranas ligeras separadas de la superficie de los cuerpos y que vuelan en todas las direcciones a través del aire. Digo que figuras e imágenes sutiles brotan de las superficies de los objetos y son emitidos en todas las direcciones en el espacio. A estas imágenes, que tienen la forma y la apariencia del objeto, le damos el nombre de membranas o cortezas. Esto, gracias a mi razonamiento, el espíritu más obtuso lo puede entender*”.

La persistencia de un objeto en la visión significa que estos elementos superficiales se desprenden e irradian de manera continua de todos los objetos. Una de las características físicas de la visión es su casi instantaneidad: los simulacros deben, entonces, ser generados y transmitidos con una extrema rapidez.

¿Qué pasa cuando los simulacros encuentran un obstáculo en su propagación? Su comportamiento dependerá de la naturaleza del obstáculo: lo pueden atravesar, se pueden dañar o pueden ser reflejados o desviados de su camino. La teoría tiene en cuenta, al menos cualitativamente, la posibilidad de la reflexión de los simulacros en un espejo: si éste está pulido el simulacro no se desnaturaliza al reflejarse.

Un fenómeno físico importante y difícil de analizar en esta teoría, es el color de los objetos. En el marco de la teoría atomista, un átomo no tiene color en sí. El color no es un atributo del átomo. La teoría supone que el color depende del movimiento y la disposición de los átomos.

En cuanto al hecho de que no podemos ver en la noche, Lucrecio alega que: “[...] *no podemos ver en la noche, porque el aire oscuro que se encuentra detrás de la luz es mucho más espeso y cierra todas las aberturas, obstruye los canales de los ojos de modo que el choque de algún simulacro no puede producir la visión*”.

¿Cómo el simulacro de una montaña puede entrar en el ojo? Se necesita suponer que este se reduce a medida que se propaga según una pirámide visual, con su vértice en el ojo del observador y su base sobre el objeto. Esta afirmación constituye un postulado de la teoría.

Platón (427-348 a.C.) en su *Cosmología* explica la génesis del mundo, desde la formación de los astros hasta el hombre. Manifiesta que la visión resulta de una comunión entre el *fuego exterior* del mundo que nos rodea y el que conforma nuestra alma. El fuego es, para Platón, el más sutil de los cuatro constituyentes elementales del mundo sublunar. Platón trata de explicar la visión confiriendo un rol activo al ojo, que se convierte en emisor de un *fuego* visual que va al encuentro del *fuego externo* que proviene de los objetos. Según esta teoría, la oscuridad se debe a que el fuego interior no tiene un fuego externo al cual logre unirse. Da también una explicación cualitativa de la reflexión en los espejos planos: “[...] *cuando nos miramos al espejo, el fuego interno de nuestra visión se refleja en el espejo liso y pulido y va al encuentro del fuego externo que está en nuestra cara al que se pega exactamente. Entonces lo que está a la derecha aparece a la izquierda.*” Redujo además la vista a una sensación mecánica, como el tacto, explicando la multitud de colores como el resultado de los diferentes tamaños de las partículas emitidas por los objetos. Si son más grandes que las partículas de los rayos visuales - que salen del ojo - el objeto parece negro, y si son más pequeñas, entonces veríamos blanco. Describió con gran detalle las mezclas de estas partículas que suponía iban a producir la multitud de colores que vemos. Advierte, sin embargo, que los humanos jamás las podremos conocer. La naturaleza última de los colores es un conocimiento reservado a los dioses ya que sólo ellos saben cómo “[...] *convertir la multiplicidad en una unidad por medio de una mezcla y también de disolver la unidad en la multiplicidad*”.

Ya sea que se opte por la versión pasiva de la visión promovida por Lucrecio o por la activa de Platón, comprender la apariencia del cielo es siempre difícil. Si la visión implica la existencia de un rayo que parte del ojo y se topa con el objeto ¿cuál es el objeto que se ve en el cielo? Al menos no se asemeja a ningún objeto visto en la Tierra.

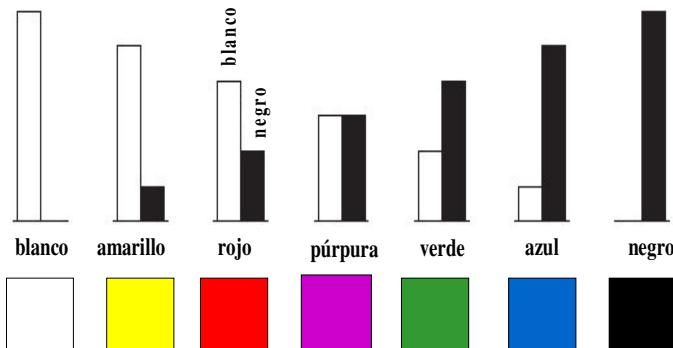
La versión de la visión pasiva adolece de una dificultad similar: ¿de qué objeto proceden las “pequeñas imágenes” del cielo? y ¿cómo luego les da sentido el ojo?

Alumno de Platón, Aristóteles continuó trabajando estas ideas. En lugar de aceptar que los ojos son puramente activos o puramente pasivos, es decir que sólo emiten rayos o sólo los reciben, se concentró en lo que está entre el objeto y el ojo. La teoría de Aristóteles no utiliza la noción de rayo visual, lo que se ve se corresponde a una *perturbación* que se propaga del objeto al ojo a través de un *medio*. Los medios, como el aire y el agua, tienen una propiedad común a la que denomina *diafanidad* (transparencia). Un medio diáfano no es visible por sí, a diferencia de un objeto, y tiene dos estados posibles: puede ser diáfano en *potencia* o en *acto*. “[...] *donde el diáfano está en potencia se encuentra la oscuridad*”. Una fuente de luz, compuesta de fuego en nuestro mundo terrestre “*actualiza*” al diáfano y le hace pasar de su estado de potencia a su estado en acto. La luz no es el fuego. La luz está en el acto del medio diáfano y es *en cierta forma el color del diáfano*. De esta manera *la oscuridad y la luz son de la misma naturaleza*. La esencia de la visión, es lo visible, que es el color. El color no es visible sin luz y es solamente en la luz que se ve el color de los objetos. Pero, en realidad, el color pone en movimiento el diáfano, el aire por ejemplo, y éste a su vez al órgano sensorial con el cual está en contacto. Para la visión, la existencia del medio es necesaria. Esta teoría, que hace uso del medio, se opone a los atomistas para los cuales la visión a través del vacío es posible: los simulacros no tienen necesidad de un soporte para propagarse. La *puesta en movimiento* constituye para Aristóteles una “*perturbación*” del aire, análoga a lo que se puede encontrar en el sonido y el olor.

Aristóteles rechaza la teoría del rayo visual mediante el siguiente argumento: “[...] *si la visión es el resultado de la emisión de luz que sale del ojo como una linterna, por qué la visión no se produce también en la oscuridad*”.

Pero ¿cómo surgen los colores? En su tratado sobre los sentidos, Aristóteles menciona tres posibilidades. En primer lugar, el medio ambiente puede producir una impresión de color en el ojo por medio de diminutas partículas blancas y negras: una posibilidad es que las partículas blancas y negras se mezclen de tal manera que, mientras cada una de ellas, por sí misma es invisible debido a su pequeñez, el compuesto de las dos es visible. Esta mezcla no puede presentarse ni como blanco ni como negro, pero como deben tener algún color, es evidente que debe haber algún otro tipo de color. Por tanto, es posible pensar que hay más colores que el blanco y el negro, y que su número

dependería de la proporción de sus componentes. Observemos que estas ideas son muy similares a las de su maestro Platón.



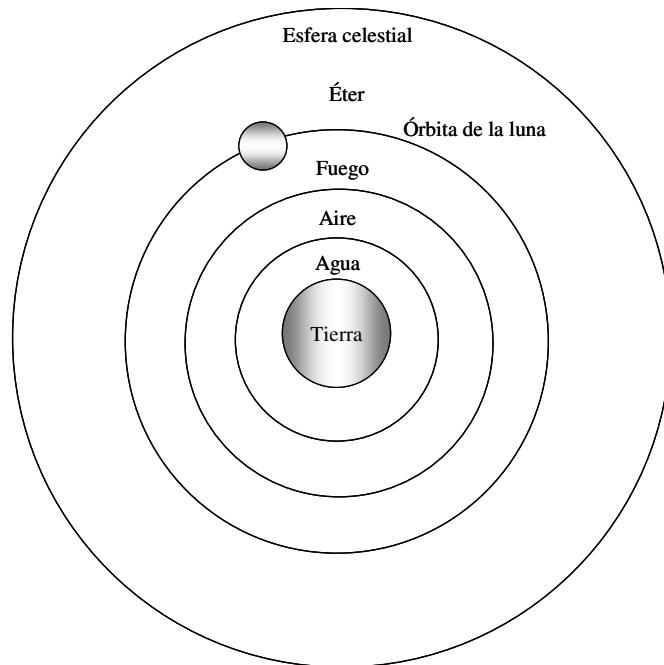
**Figura 1.2.** Colores producidos por la mezcla en diferentes proporciones de blanco y negro, según Aristóteles, en el tratado *Sobre los sentidos*.

Aristóteles afirma que los colores se pueden ordenar en una escala que va del claro al oscuro, en función de las diferentes proporciones de blanco y negro. Los colores oscuros, como el azul, contienen sobre todo negro y sólo un poco de blanco, mientras que los colores claros, como el amarillo y el naranja, la proporción de blanco predomina (Fig.1.2). Esta derivación de todos los colores a partir de la pareja complementaria blanco-negro es un ejemplo de un argumento recurrente de la filosofía natural aristotélica: pares de opuestos, como caliente y frío, húmedo y seco, o livianos y pesados se emplean comúnmente para ordenar los fenómenos. Aristóteles menciona cinco colores entre el blanco y el negro: amarillo, rojo, púrpura, verde y azul.

La proporción de partículas blancas disminuye en este orden, la claridad de estos colores por lo tanto, también disminuye. El azul es próximo al negro y contiene muy poco blanco. Aristóteles admite un total de siete colores básicos incluyendo al blanco y al negro. Afirma que los colores resultan especialmente puros cuando el negro y el blanco se mezclan en una proporción de números enteros pequeños (por ejemplo, 2:3 o 3:4). Aquí Aristóteles está evocando a Pitágoras quien había encontrado que cuerdas con las relaciones 1:2, 2:3 y 3:4 producían, al hacerlas vibrar, combinaciones de sonidos agradables. Este paralelismo no es casual, escribe Aristóteles, porque los colores están de hecho relacionados con los tonos musicales.

Para Aristóteles, otra manera en que los colores se pueden producir es a través de una mezcla física de sustancias coloreadas, de la que emerge otro color. Otros colores también pueden aparecer cuando un color luminoso brilla a través de un medio transparente. El efecto del humo y la niebla es un ejemplo que muestra cómo el aire puede cambiar la percepción del color del sol que brilla a través de él. Aristóteles

identifica aquí que la transmisión de la luz a través de un medio puede producir un cambio en el color del sol, en este caso verlo de color rojo. ¿Se podría mediante un argumento similar explicar el azul del cielo? En la búsqueda de una respuesta, debemos tener en cuenta lo que pudo haber significado “cielo” para el filósofo griego. Más de un siglo antes de Aristóteles, en sus reflexiones sobre la luz y el color, Empédocles había propuesto que, además de los elementos tierra, agua y fuego, el mundo está hecho también de un cuarto elemento, el aire. En su libro *Sobre los Cielos*, Aristóteles modifica esta idea y divide al mundo en la región terrestre, que se encuentra en el interior de la órbita de la Luna alrededor de la Tierra, y la esfera celeste, que se sitúa fuera de la órbita lunar. A su juicio, la tierra, el agua, el aire y el fuego son los elementos de la región terrestre. Estos se caracterizan por su tendencia a ocupar espacios determinados de conformidad con sus movimientos naturales característicos. Los elementos pesados, como la tierra y el agua, tienen una tendencia a venirse hacia abajo. Los elementos ligeros: aire y fuego a irse hacia arriba.



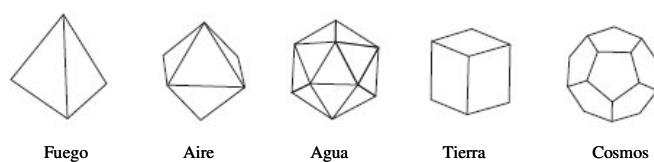
**Figura 1.3.** En la cosmología de Aristóteles, los cuatro elementos tierra, agua y fuego forman esferas concéntricas alrededor del centro del universo (la Tierra). Afuera de la órbita lunar, el sol, planetas y estrellas se mueven en trayectorias circulares perfectas alrededor de este punto central

Para Aristóteles, el universo es finito y tiene un centro. Este centro es el lugar natural adonde va a terminar el elemento más pesado: la Tierra. De acuerdo con su peso, los otros elementos se asientan alrededor de la Tierra, en capas, y crean las esferas de agua, aire y fuego (Fig.1.3). La esfera de fuego se extiende hasta la órbita lunar y marca el límite superior de la región terrestre. El mundo sublunar está formado por los cuatro elementos y sometido a la generación y a la corrupción, es decir, al cambio y al movimiento. Por el contrario, lo que se encuentra en la esfera celeste es inmutable y

eterno. Allí, la luna, el sol, los planetas y las estrellas se mueven en órbitas circulares alrededor de la Tierra. El espacio entre los cuerpos celestes está compuesto por la quintaesencia o éter, que es el elemento perfectamente transparente y eterno de los cielos.

Mientras consideraba a la esfera celeste y sus cuerpos como objeto de estudio de la astronomía, los objetos de estudio de la meteorología se encuentran en la esfera del aire y el fuego, es decir, entre la Tierra y la órbita lunar. Sin embargo, para Aristóteles, los fenómenos meteorológicos incluían no sólo la lluvia, la evaporación, el viento, las nubes y el arco iris, sino también los cometas, la Vía Láctea e incluso los terremotos y las erupciones volcánicas. Si esta lista se nos aparece hoy como una mezcolanza entre fenómenos de la meteorología, la astronomía y la geología, para Aristóteles era una agrupación lógica. Él consideraba que la tarea de la meteorología era investigar las emanaciones de la tierra, así como la forma en que el calor del sol y las demás estrellas influían sobre ellas.

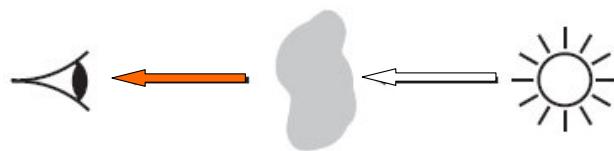
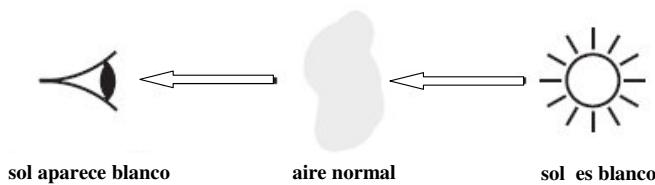
El contenido de las esferas de aire y fuego son las exhalaciones que se levantan cuando la Tierra se calienta por el sol. Aristóteles distingue entre dos tipos de exhalaciones. Una es similar al vapor y se debe a la humedad de la tierra: es caliente, húmeda y pesada. La otra es similar al humo. Viene de la tierra misma y es caliente, seco y ventoso. El ascenso de las exhalaciones es una etapa del ciclo de *existir, ser y perecer*, que es característica de la región terrestre. Allí, cada uno de los elementos se pueden transformar en los otros: el agua se convierte en aire a través de la evaporación, y el aire se convierte en agua a través de la lluvia. Estas transformaciones siguen las leyes que resultan de la composición de los elementos. Aristóteles supone que cada uno de los cuatro elementos es una combinación de las propiedades de húmedo o seco y caliente o frío. El agua es húmeda y fría, mientras que el aire es húmedo y caliente. Si se desea cambiar el agua en el aire, hay que calentarla. Por el contrario, el aire se convierte en agua a través del enfriamiento.



**Figura 1.4.** Platón imaginaba a los átomos de fuego con la forma de tetraedros, a los del agua como icosaedros, a los de la tierra como cubos y los del aire como octaedros.

Aristóteles se conforma con describir las propiedades macroscópicas de los cuatro elementos y los procesos de su transformación, no especula sobre si los elementos específicos poseen estructuras microscópicas. En esto se diferencia de Platón, que había concebido a los elementos como compuesto de átomos: pequeños cuerpos geométricos regulares (Fig. 1.4). Aristóteles se opuso a esta idea, pero estuvo de acuerdo con Platón en que los elementos son incoloros.

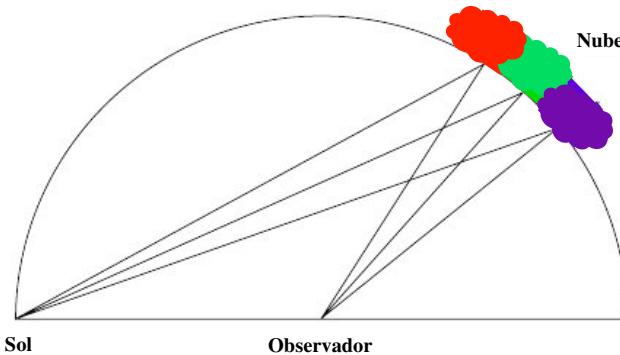
Visto de cerca, el aire es incoloro, y parece completamente transparente. Pero cuando se condensa - escribe Aristóteles en Meteorología - puede crear diferentes colores en el cielo. Especula que este mismo aire, en el proceso de condensación, toma todo tipo de colores. La luz penetra más débilmente a través de un medio más denso, y el aire, cuando permite la reflexión, produce diferentes colores, y particularmente el rojo y el púrpura. Estos colores se observan generalmente cuando el fuego, de color blanco se superpone y se combina con el aire, como ocurre por ejemplo, cuando las estrellas, en su salida o la puesta, aparecen de color rojo cuando se las ve a través de un medio lleno de humo (Fig.1.5).



**Figura 1.5.** Interpretación de Aristóteles de los efectos del aire condensado sobre el color del sol.

Finalmente parece que hay dos formas en las que los colores se presentan en la atmósfera. Una es a través de la atenuación de la luz, y la otra a través de su reflexión. Ambas formas presuponen aire condensado, mientras que aire puro aparentemente permite que los colores de los objetos pasen a través del mismo. La idea de que una capa reflectante de aire causa “*todo tipo de colores*” apunta a su teoría de los colores del arco iris, que ocupa una parte sustancial de su Meteorología. Aristóteles explica el arco iris como un fenómeno óptico que resulta de la reflexión de la luz solar en una nube saturada de humedad, cuando el observador tiene el sol en su espalda. En su opinión, un

arco iris se compone de sólo tres colores: violeta, verde y rojo (a partir de la parte interior del arco hacia fuera). Aristóteles considera que el amarillo que aparece en el arco iris es una ilusión óptica. Puesto que la secuencia de los tres colores es la misma en todos los arco iris, infiere que hay un principio universal detrás de él.



**Figura 1.6.** Dibujo de Aristóteles para explicar el arco iris.

Para explicar estos colores, Aristóteles supone que las partículas de vapor, en la nube, se comportan como pequeños espejos que reflejan la luz blanca del sol. Esta reflexión es una de las tres causas responsables de la creación de colores, junto con la atenuación de la luz solar, así como el debilitamiento de la visión a distancias grandes. Esto último, sin embargo, contradice su afirmación de que no hay tal cosa como un rayo visual. Sin embargo, afirma, que con una visión fuerte, los colores reflejados parecen de color rojo, con una visión más débil, verde y con una aún más débil, violeta. De acuerdo con esta escala de colores, es la debilidad de la visión la que hace que los colores se vean más oscuros. A medida que disminuye la luminosidad los colores pasan del rojo al violeta.

Apelando a un recurso habitual de su obra Meteorología, Aristóteles utiliza un dibujo para esclarecer la posición relativa entre la nube, el observador y el sol (Fig. 1.6). Coloca al observador en el centro de un semicírculo y dispone al sol y a la nube sobre una circunferencia. Sabe que el sol, como todo cuerpo celeste, está mucho más lejos del observador que la nube, a la que localiza en la esfera de aire. De este modo, en lugar de mostrar las distancias en sus proporciones reales, su dibujo representa la bóveda aparente del cielo en la que se encuentran tanto el sol como la nube.

Sobre la base de esta descripción no es difícil para Aristóteles explicar la secuencia de colores. Se desprende de la ilustración que la parte frontal superior de la nube está más cerca del Sol que su parte media y especialmente de su parte inferior. Al mismo tiempo, toda la nube está a la misma distancia del observador. La trayectoria de los rayos de luz desde el sol hasta llegar al observador, después de reflejarse en la nube, es más corta

cuando se reflejan del borde superior de la nube, y es más larga cuando se refleja de su borde inferior. Supone que la atenuación aumenta con la distancia recorrida y que el color rojo debe corresponder a la menor atenuación de los rayos visuales. Puesto que los rayos que se reflejan en el borde superior de la nube recorren la distancia más corta, el borde superior del arco iris aparece, entonces, de color rojo. La explicación de la aparición de los otros dos colores, verde y violeta, es similar. Los rayos que se reflejan de la parte inferior de la nube son los que tienen un recorrido más largo y aparecen de color violeta. Los que se reflejan en las nubes intermedias aparecen de color verde.

Este empleo creativo de los rayos visuales para explicar los colores del arco iris parece que puede utilizarse para explicar cualquier color que se observa en la atmósfera. Pero, no se conforma con una solución tan fácil y diferencia los colores del arco iris del de las estrellas de baja altitud, que vistas a través de los gases de la atmósfera aparecen de color rojo. El mejor ejemplo de esto es cuando el sol sale y se pone, con un intenso color rojo, que siempre ha fascinado a la humanidad. En su obra *Sobre los Sentidos* afirma que la condensación del aire es una condición necesaria para la aparición de los colores en la atmósfera.

Teofrasto (371-278 a.C.), un discípulo de Aristóteles, también se ocupó de la teoría del color. Ahora está considerado como el autor de la obra *De Coloribus* que se atribuyó a su maestro hasta el siglo XX. A pesar de que en este texto claramente se basa en la teoría del color de su maestro, Teofrasto no lo sigue en cada detalle. Ambos filósofos coinciden en que el medio transparente es un requisito previo para la visión y que todos los colores resultan de una mezcla de blanco y negro: la luz y la oscuridad. A diferencia de Aristóteles, Teofrasto ubica a los colores en relación con los cuatro elementos. El fuego (así como el sol) es de oro, y el aire y el agua, son de color blanco. La Tierra es también blanca, pero parece como si estuviera “manchada” con varios colores. Mientras que el negro, para Teofrasto, es un color que puede ser resultado de alguna propiedad de un material pero representa esencialmente la ausencia de luz. Considera a la espuma del mar y a la nieve como una prueba de que el aire es de color blanco, pues las interpreta como estados comprimidos del aire.

No podemos ver los colores en su pureza natural, escribe Teofrasto, porque siempre están alterados por la luz y la sombra. Los colores de todos los objetos están influidos por la iluminación, la naturaleza del medio a través del cual irradian sus rayos de luz y por el fondo que se coloca detrás de ellos. Así, los colores de los objetos parecen

diferentes cuando se los ve a la luz del sol, o a la sombra, con una luz fuerte o una débil. Los medios que son densos y transparentes aparecen turbios, escribe Teofrasto, mencionando al agua, el vidrio y el aire denso como ejemplos. La densidad de estos medios atenúa los rayos de luz que los penetran: “[...] *el aire que vemos de cerca, alrededor de nosotros, parece no tener ningún color, porque es muy enrarecido y da paso a los rayos de luz, que así resplandecen al atravesarlo; en cambio, cuando lo vemos en una masa profunda, la luz se frena y la oscuridad penetra en ese punto y aparece de un azul oscuro*”. El discípulo de Aristóteles encuentra una confirmación en el azul cada vez más profundo que adquiere el cielo al caer la noche, “[...] *porque donde ya no hay luz, el aire deja pasar la oscuridad y parece de un azul profundo, aunque el aire, en sí mismo, es la más blanca de todas las cosas*”.

Es este el texto más antiguo en el que se reconoce una pregunta: el azul del cielo necesita una explicación. Y ésta no es una cuestión menor, porque una pregunta que no se formula nunca encuentra una respuesta.

Teofrasto estuvo cerca de identificar el azul del cielo con la interacción de la luz con el aire. Su vacilación es comprensible porque si el aire es verdaderamente transparente, resulta difícil comprender por qué se vuelve azul y no de otro color. Por lo tanto, necesitó que la oscuridad del cielo nocturno se mezcle con el blanco del aire para explicar el azul del cielo. En realidad, como lo señalamos más arriba, el mismo Aristóteles había especulado con la idea de que la gama de lo que llamamos los diferentes colores está formada por varias mezclas de negro y blanco en determinada proporción.

Después de estos sugestivos comienzos, la explicación de los colores no avanzó mucho durante unos mil años. Aristóteles continuó siendo la fuente de referencia. Los pensadores musulmanes extendieron varias de las teorías astronómicas de los griegos, desarrollaron la alquimia, la astrología y sobre todo las matemáticas, donde realizaron la síntesis de las obras geométricas griegas con el álgebra y la aritmética de los indios e introdujeron la trigonometría, el desarrollo en serie y las ecuaciones. En óptica, la contribución de los árabes ha sido fundamental.

Al-Kindi (801-873), que fue uno de los primeros que hizo traducir al árabe la obra de Aristóteles, atribuía la visión a los rayos que emanaban de los objetos y que penetran en los ojos. En sus palabras: “[...] *con referencia a la causa del color celeste que se ve en*

*la atmósfera en dirección del cielo y que se considera el color del cielo, se desprende que el celeste no es el color del cielo mismo, sino sencillamente algo que aparece a la vista*”, es decir, es un producto de la visión humana. Estas ideas son muy similares a las de Platón. Al-Kindi agrega que sólo los objetos sólidos están plenamente iluminados y, por lo tanto, tienen, verdaderamente, un color, ya que los cuerpos no sólidos como el agua, el aire, el fuego y el cielo transparente no están completamente iluminados y, por consiguiente, no tienen ningún color. De acuerdo con Al-Kindi, “[...] el aire que rodea la Tierra está débilmente iluminado por las partículas terrestres disueltas en él y que se vuelven rojizas debido al calor que han recibido de la luz solar y por la reflexión de los rayos de la Tierra.” En otras circunstancias “[...] estas luces se mezclan formando un color que es intermedio entre el oscuro de la sombra y la luz y ese es el color azul celeste del cielo.” En suma, esta explicación se fundamenta en las *partículas terrestres* suspendidas en la atmósfera que dispersan tanto la luz que viene del Sol como la que se refleja desde la Tierra.

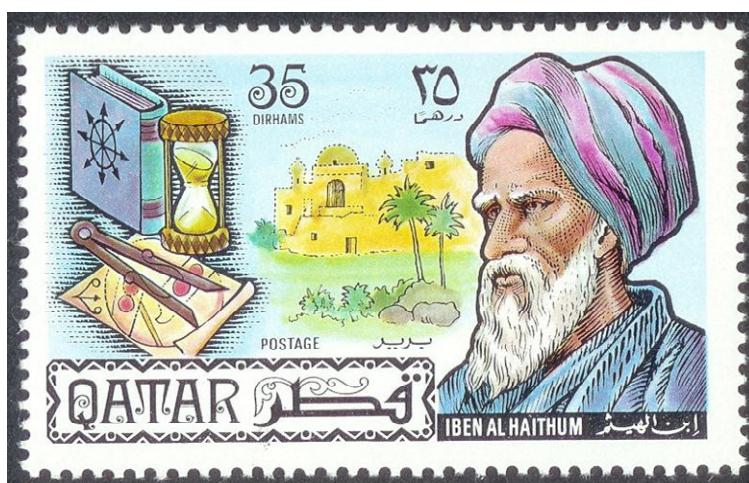
Esta teoría representa un distanciamiento con respecto a las teorías de la oscuridad de Platón y Aristóteles. Al-Kindi es el primero que sugiere que hay algo en la misma atmósfera que refleja la luz, aunque no explica su naturaleza.

Iben-Al-Haithum (965-1040), conocido en occidente como Alhazen, fue aún más lejos. La Óptica de Al-Haithum es la obra más brillante escrita sobre la filosofía natural desde la muerte de Arquímedes. En ella trata con sumo detalle el tema de la reflexión (el retorno de los rayos de luz que chocan contra otro medio, como los que llegan desde el aire y daban contra un espejo) y el de la refracción (la inclinación de los rayos luminosos que penetran oblicuamente desde un medio a otro, como desde el aire al agua). Suponía además que los rayos estaban formados por pequeñas partículas y que la velocidad de los rayos era enorme pero finita.

Alhazen sostenía que el color del mar sólo refleja el del cielo y destacaba que el azul del céntit es “[...] más puro y está más cerca de la oscuridad que el que está hacia el horizonte”. Opinaba que esto se debe a que “*la longitud de los rayos que provienen de las partículas de la esfera atmosférica es diferente a la vista; la que va hacia el céntit es más corta y la que va al horizonte es mayor*”. Aquí utilizó su hipótesis de que la luz son rayos cuya apariencia depende del recorrido que hacen a través de la atmósfera. “[...] si en el aire hay sustancias sólidas como el vapor y el humo y la luz resplandece sobre

ellas, aparecen los colores de las nubes y algunos otros, de acuerdo con sus grados en cuanto a espesor, delgadez, claridad o turbiedad'.

Como Al-Kindi, sostenía que la luz del cielo es una *reflexión* procedente de *sustancias sólidas* suspendidas en el aire. Pero en lugar de atribuirlas al polvo, él las consideraba *vapor* o *humo*. Suponía que la lluvia podía limpiar el aire de polvo y entonces ¿cómo podía permanecer el color azul? Sin embargo, admitía que las *sustancias sólidas* como el vapor o el humo tenían un comportamiento esencialmente diferente al del polvo (¿no se asentaban nunca?). Aun cuando supongamos que las partículas se las arreglan para permanecer suspendidas en el aire, no queda claro por qué su presencia hace que el cielo nos parezca azul y no de cualquier otro color.



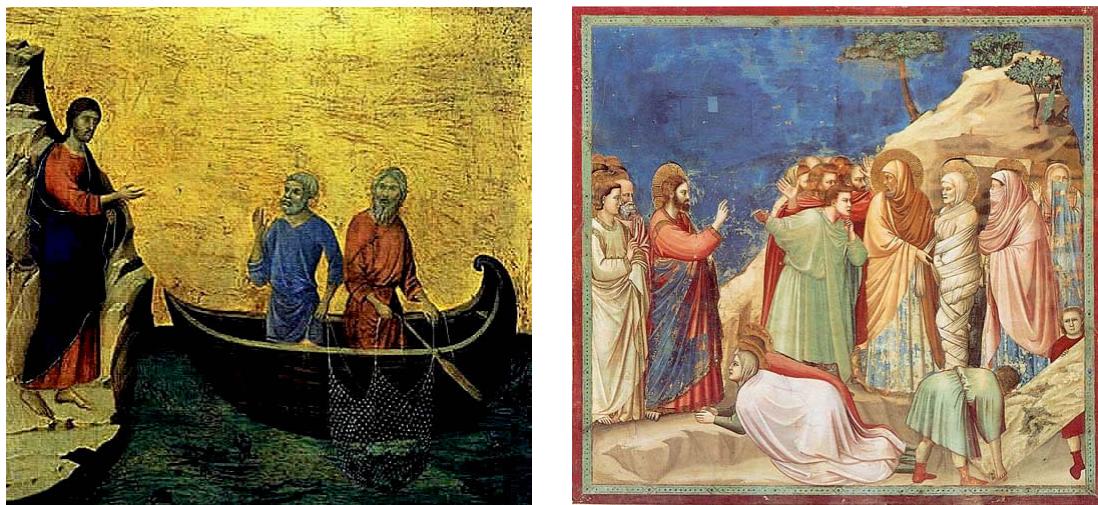
**Figura 1.7.** Estampilla del correo de Qatar en homenaje a Iben Al Haithum.

El estudio de Iben-Al-Haithum no tiene un final concluyente y él estaba muy consciente de la importancia de estos problemas irresueltos. Las últimas palabras de su obra reflejan su perplejidad: “*Dios conoce la verdad*”.

Las obras de Iben-Al-Haithum reaparecieron en Occidente poco después de que las obras de Aristóteles fueran traducidas al latín en el siglo XII. Roger Bacon (1220-1292) en su *Opus Maius* hace una recapitulación de sus concepciones sobre una ciencia natural basada en las matemáticas y la experimentación. La parte óptica de esta obra se inspira en el trabajo de Alhazen y no avanza mucho más de lo que éste hizo en ese campo.

Bacon realiza una interesante comparación entre una masa de agua con la atmósfera: “[...] las partes de agua profunda proyectan una sombra sobre aquellas que la suceden, produciéndose así una oscuridad que absorbe la calidad de la rarefacción. Al igual que el conjunto de una masa de agua que se presenta como un cuerpo denso, lo

“mismo sucede con el aire o el medio transparente celestial que, percibido desde una cierta distancia, se vuelve visible, lo cual no ocurre si está a corto alcance”. Más adelante continuaba su razonamiento del modo siguiente: “[...] en el agua profunda el color aparece debido a las sombras proyectadas por las partículas”. El énfasis puesto por Bacon en la “sombra” proyectada por estas “partículas” (partes) muestra hacia dónde apuntaba realmente: el azul es una especie de sombra.



**Figura 1.8.** A la izquierda una pintura bizantina del siglo X muestra al cielo de color dorado. A la derecha una pintura de Giotto del año 1300, aproximadamente, muestra el cielo de color azul.

En la época de Roger Bacon se produjo un curioso cambio en la preferencia del color. Durante los siglos XI y XII, el azul comenzó a adquirir un nuevo tipo de valor simbólico y estético del que antes carecía. En las pinturas bizantinas y las primeras italianas se utilizaba el dorado y no el azul para representar el cielo. El Giotto fue uno de los primeros artistas que pintó el cielo de color azul, como se ve en el fresco que presenta la Resurrección de Lázaro en la Capilla Arena de Padua (1305-1306). El tono azul “ultramarino” se conseguía pulverizando el *lapislázuli*, que luego se empleaba como pigmento. Era tan costoso y raro que se decía que provenía de “*allende los mares*”, y de aquí el sentido literal de la palabra ultramarino. Su alto precio también implicaba que sólo los grandes maestros podían utilizarlo. Estas técnicas artísticas favorecieron otros enfoques del color del cielo.

El libro *Della Composizione del Mondo* de Ristoro d’Arezzo, publicado en 1282, es el tratado científico más antiguo, escrito en italiano y no en latín, que ha sobrevivido. Gran parte del libro es una compilación de fuentes antiguas que incluían a Aristóteles y a sus seguidores musulmanes. Acompañando las ideas comunes de la época *La cosmología*

de Ristoro estaba plagada de astrología. Sin embargo, en una época en la que la curiosidad era un exceso, Ristoro era muy impertinente y sostenía que “[...] es horrible que los habitantes de una casa no sepan cómo está hecha.”

Ristoro repudiaba explícitamente la opinión de aquellos que “[...] dicen que esos colores (los del cielo) son producto de los vapores del aire. [...] la verdad los contradice puesto que si, entre el ojo y el cielo, hubiera aire teñido de azul, todas las estrellas parecerían azules y eso no es lo que vemos.” Para saber más sobre el color del cielo, Ristoro investigó la práctica de los “[...] pintores avezados que utilizan los colores opuestos, la luz y la oscuridad, y de esa mezcla resulta el celeste. [...] y al mirar el cielo vemos mezclados dos colores opuestos, la luz del sol y la oscuridad a través de la profundidad que el ojo no puede percibir en el cielo, que no tiene ningún límite ni lugar donde descansar”. Ristoro comparó el color del cielo con el que se observa mirando el agua profunda,... “[...] de tal modo que, mirando el cielo, uno encuentra la luminosidad mezclada con la oscuridad del cielo profundo, como el agua oscura cuando está iluminada, y de esta mezcla de oscuridad y luz resulta el color azul”. Este razonamiento es similar al de Bacon y nos remonta a las ideas que ya tenían los antiguos griegos.



**Figura 1.9.** La perspectiva aérea utilizada por Leonardo (izquierda) y por Van Gogh (derecha).

Leonardo da Vinci (1452-1519) seguramente leyó los escritos de Ristoro, de Roger Bacon y posiblemente los de Alhazen. Los escritos de Leonardo contienen ideas muy atractivas sobre las causas del cielo azul y la apariencia de los humos y nieblas tanto en condiciones naturales como los generados bajo control experimental. El interés de Leonardo en el estudio del cielo se relacionaba con los problemas de la perspectiva aérea que enfrentaba en la pintura de un paisaje. Esto se hace evidente en los siguientes pasajes de sus cuadernos:

*“[...] en una atmósfera de igual densidad los objetos más alejados vistos a través de ella, como las montañas, como consecuencia de la gran cantidad de atmósfera que se interpone entre el ojo y estos objetos, éstos aparecen de color azul y casi del mismo color de la propia atmósfera cuando el Sol está en el este. Por lo tanto se deben pintar los objetos más cercanos con su color real, pero a los más lejanos con colores menos definidos y con más azul, por lo que si están cinco veces más lejos, se deben hacer cinco veces más azul”.*

Leonardo, además, se dio cuenta de que el cielo se vuelve más oscuro cuando se asciende a una montaña. Esto lo atribuyó, correctamente, al adelgazamiento de la capa superior de la atmósfera en función de su altitud, concluyendo que por encima de la atmósfera el cielo debe aparecer negro. Su interpretación del origen del color azul cielo, sin embargo, ha demostrado ser sólo parcialmente correcta. Escribió: “[...] digo que el azul que se ve en la atmósfera no es su propio color, sino que está causada por la humedad que se calienta y evapora en diminutas partículas imperceptibles, que los rayos solares al atravesarlas hace que parezcan luminosas en contra de la profunda oscuridad intensa de la región que está por encima de ellos. Y esto puede ser visto, como yo mismo lo observé, cuando subí al Monte Boso, (un pico de los Alpes que divide Francia de Italia) y vi el exceso de atmósfera oscura por encima de nuestras cabezas, mientras que los rayos del sol que incidían sobre la montaña tenían mucho más brillo que en las llanuras de abajo porque el espesor de atmósfera que se interponía entre la cumbre de la montaña y el sol era menor”.

Muchas de las primeras explicaciones (formuladas por los antiguos griegos hasta Leonardo da Vinci, en el siglo XV), que pueden traducirse en términos de la física actual sugieren que el azul del cielo se debe, o bien, a las partículas suspendidas en el aire o bien al aire mismo (a las moléculas del aire). Cada una presenta sus problemas: si son partículas suspendidas, ¿de qué son y cómo se mantienen en suspensión? Si fuera el aire solo, ¿cómo puede ser de un color y parecer incoloro alrededor de nosotros? De ahí proceden cuatro siglos de controversias.

Leonardo propone también el siguiente experimento: “[...] si uno produce una pequeña cantidad de humo quemando madera seca y los rayos del sol caen sobre ese humo, y si uno se coloca detrás de un trozo de terciopelo negro sobre el cual no da el Sol, verá que la tela negra aparece de un bello color azul”. El experimento de Leonardo

confirma la importancia de la oscuridad del fondo: el bello color azul no aparece si el terciopelo está iluminado por la luz.



**Figura 1.10.** Foto del cielo tomada desde un avión. Se observa *la profunda oscuridad intensa de la región que está por encima del avión*.

Leonardo no pudo dilucidar por qué el cielo es azul, pero agregó varias observaciones y experimentos interesantes. La idea de que el color del cielo está producido por partículas que están suspendidas en el aire, aunque en última instancia no es la correcta, condujo a una comprensión más profunda del fenómeno. Leonardo estaba en el camino correcto cuando, con su intuición, afirmaba que el azul del humo y el azul del cielo estaban conectados. Pensaba también que el azul de las montañas distantes se debía a los mismos mecanismos físicos que producían los dos anteriores. El azul de las montañas distantes está relacionado con lo que ahora conocemos como *la perspectiva aérea* o *perspectiva atmosférica* que alude al efecto de la atmósfera en la apariencia de un objeto cuando se lo observa a una distancia dada.

## Los colores en el periodo de la revolución científica

No hay duda de que la publicación de Sir Isaac Newton (1642-1727) de los *Principios matemáticos de la filosofía natural* (o simplemente los *Principia*) en 1687 marcó un cambio revolucionario que aceleró la instauración del método científico moderno. En esta publicación, no sólo introdujo el concepto de la gravedad universal, sino que también expresó las leyes del movimiento en términos matemáticos. Sin embargo, Newton no concibió solo esas ideas. Él, de hecho, sostenía que fue capaz de ver más lejos que otros porque “*se puso sobre los hombros de gigantes.*”

Para entender mejor cómo Newton se inspiró para escribir los *Principia*, es importante examinar en primer lugar a las personas que contribuyeron a la elaboración de su metodología y sus concepciones. Para empezar, Galileo Galilei (1564-1642), astrónomo y matemático que pasó muchos años estudiando el movimiento de proyectiles. En su obra *Discursos y demostraciones relativas a dos nuevas ciencias* (1638), demuestra que los proyectiles que caen siempre siguen una trayectoria parabólica curvada hacia el suelo. Su razonamiento era que el proyectil se mueve simultáneamente en dos direcciones, horizontal: hacia delante, y vertical: en la dirección de la aceleración de la gravedad.

Mientras Galileo estudiaba el movimiento de proyectiles, el astrónomo alemán Johannes Kepler (1571-1630) estaba estudiando el movimiento planetario. Utilizando los datos astronómicos de su profesor Tycho Brahe (1546-1601), Kepler fue capaz de explicar algunos de los raros movimientos “hacia atrás” de los planetas, de Marte específicamente, conjeturando que los planetas no se mueven alrededor de la Tierra sino alrededor del sol. En su *Nueva Astronomía* (1609) describe el movimiento orbital de los

planetas alrededor del sol a través de tres leyes, que se conocen hasta hoy como *las leyes de Kepler*.

Una explicación alternativa fue ofrecida por el filósofo y matemático francés René Descartes (1596-1650). Conjeturaba que toda la materia está en reposo a menos que sea movida por una fuerza externa. Descartes, en *Le Monde* (1630) y *Principios de la filosofía* (1644), explicaba que toda la materia del universo está unida en grupos que se vuelven sobre sí mismos formando vórtices circulares. Suponía, entonces, que era este movimiento vorticoso el que hace que todos los planetas (incluyendo la tierra) giren alrededor del sol como si el sistema solar fuera un remolino gigante.

Descartes creía que se podía construir una teoría utilizando un método deductivo basado únicamente en la razón. En otras palabras, presumía que una teoría científica podía ser aceptada como verdadera si es compatible con la evidencia empírica reunida después de formulada la teoría. Por el contrario, el filósofo Francis Bacon (1561-1626) era partidario del método inductivo para la elaboración de una teoría científica como lo describe en su obra *Novum Organum* (1620). El método propone la realización de una intensa recopilación de casos concretos del fenómeno estudiado para posteriormente realizar una inducción, que tenga en cuenta las características o propiedades comunes entre ellos. Manifiesta que de esta manera se consigue un “*enunciado general*” (o “*axioma*”) que está basado en esos experimentos particulares pero que tiene un alcance más universal que éstos.

Cuando Newton publicó su *Principia* en 1687, mostró una mayor preferencia por el método inductivo de Bacon. Sin embargo, pese a que desdeñaba el método deductivo de Descartes y su “*materia vorticosa*”, encontró a la geometría analítica cartesiana de gran utilidad para la formulación del cálculo diferencial e integral. Además utilizó el concepto de la inercia de Galileo y la idea de las órbitas planetarias elípticas de Kepler. Sintetizó todas estas ideas y principios y los mejoró, creando un sistema completo para el estudio de la mecánica y el movimiento de los cuerpos materiales, que podía ser aplicado tanto en la tierra, en el sistema solar o en cualquier lugar del universo.

Descartes y Newton también se dedican a la óptica y esbozaron una teoría sobre los colores. Ambos intentaron explicar el arco iris y el color azul del cielo.

En 1637, Descartes publica su *Discurso del método para guiar la razón y buscar la verdad en las ciencias*. Retoma las ideas de Galileo que más apreciaba: dudar de manera

sistemática, recurrir a la experiencia y al lenguaje matemático, preferir la razón a las ideas admitidas. Pretende establecer un procedimiento para buscar la verdad utilizando “*afirmaciones claras, distintas e incontrovertibles*” y las aplica a importantes cuestiones científicas en sus tres ensayos: *Óptica*, *Geometría* y *Meteorología*. En la *Óptica* presenta una nueva concepción de la luz, en la *Geometría* plantea una matemática simbólica vigorosa y en la *Meteorología* aplica sus principios a resolver antiguas preguntas sobre el tiempo y el clima. Uno de los objetivos de Descartes era reemplazar la ciencia aristotélica por un *nuevo y potente método*.

Descartes consideraba sumamente importante la meteorología, pues las nubes y el cielo son tan imponentes y maravillosos que él pensaba que si lograba explicarlos “*ya no habrá sucesos en los que algo que veamos en ellos nos maraville [...] [y] creeremos fácilmente que será también posible hallar las causas de todas las cosas más admirables que hay en la tierra*”.

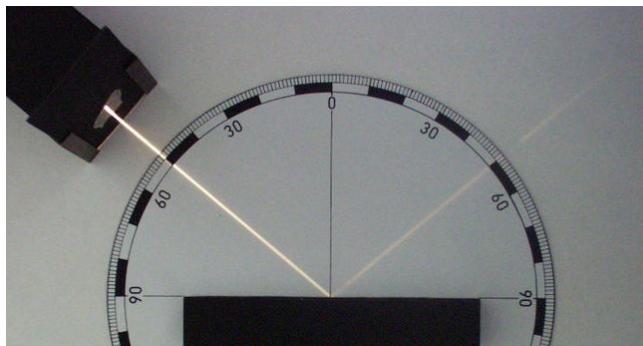
En el siglo XVII, el concepto de rayo luminoso, las nociones de propagación rectilínea, el camino óptico, las leyes de reflexión estaban bien establecidas pero subsistían algunos interrogantes: ¿cuánto vale exactamente el ángulo de refracción? ¿en qué consisten los colores? ¿la velocidad de la luz es finita o infinita? ...

En la filosofía cartesiana, en el universo no hay vacío, sino “*alguna materia muy sutil y muy fluida*” que llena los “*poros*” de los cuerpos. Esta materia sutil de Descartes, que es muy parecida al éter de Aristóteles, “[...] *se extiende sin interrupción desde las estrellas hasta nosotros [...] las partes de esta materia sutil que toca el lado del sol que nos mira, se ponen en movimiento directamente hacia nuestros ojos*”. La luz es entonces una acción que un cuerpo luminoso produce sobre esta materia sutil. Descartes supone que la luz llega de los cuerpos luminosos hasta nuestros ojos en un instante. Los objetos luminosos como el sol, las estrellas o cualquier otro “*fuego*” sobre la tierra producen un movimiento de esta materia sutil. Los rayos de esta luz no son otra cosa que las líneas que salen del fuego que produjo esta acción.

“*Estos rayos deben ser imaginados exactamente rectos cuando están pasando por un solo cuerpo transparente que es igual a si mismo en todos sus puntos, pero cuando encuentran algún otro cuerpo, pueden ser desviados por ellos, o amortiguados, de la misma manera que lo es el movimiento de una bala o de una piedra tirada en el aire,*

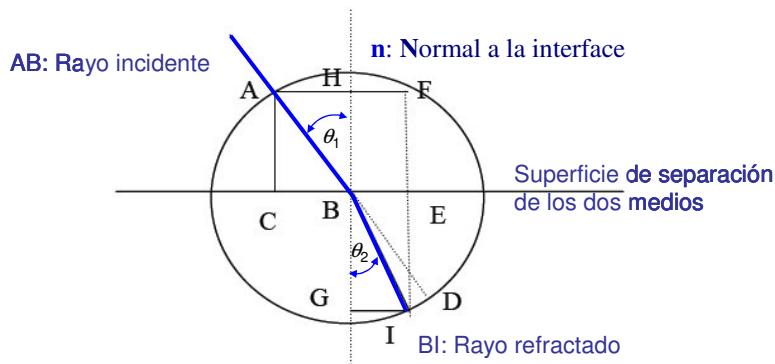
por aquellos que encuentra. Porque es entendible que la acción o la inclinación a moverse, que tiene la luz, siga las leyes del movimiento”.

Así, la luz es una acción que se siente al instante, mientras que el medio de esta acción, el rayo de luz, obedece a las leyes del movimiento y pueden amortiguarse, es decir, hacerse más lento. Esta dualidad hace que su teoría sea un tanto inconsistente.



**Figura 2.1.** Cuando un fino haz de luz incide sobre un espejo, el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.

Para explicar la reflexión de la luz en los espejos, Descartes la compara (como ya lo había hecho Alhazen) a los rayos de luz con una bala que rebota de la superficie del espejo como se muestra en la Fig.2.1. La ley de la reflexión es muy simple: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. La explicación mecánica para esta ley es la siguiente: se puede descomponer la velocidad del corpúsculo incidente, en una componente normal al espejo y en una componente paralela a la superficie del espejo. En el momento del choque del “corpúsculo” con la superficie del espejo su componente de velocidad perpendicular cambia de signo, mientras que su componente paralela permanece inalterada.



**Figura 2.2.** El rayo incidente AB al llegar a B, entra al otro medio y se produce una desviación de su trayectoria. En lugar de seguir en la dirección BD, se desvía siguiendo la dirección BI.

Supongamos ahora que la luz incide sobre la superficie lisa de una placa de vidrio como se muestra en la Fig.2.2. Si el rayo se propagara siempre en línea recta, la trayectoria del rayo sería la indicada por la línea ABD. En realidad esto no ocurre, sino que en el punto B de incidencia se produce una desviación de la trayectoria, siguiendo una dirección tal

como la BI que se indica en la figura. Esta desviación del rayo de su trayectoria rectilínea, cuando entra en el vidrio, se conoce como *refracción* del rayo.

Las tablas para el ángulo de refracción, en función del ángulo de incidencia, para la refracción de la luz en el agua y en el vidrio, ya eran conocidas por los griegos, pero nadie había podido determinar una relación analítica entre los ángulos de incidencia y refracción. Snell, hacia 1625, se ocupó del asunto y lo resolvió. Pero Snell muere muy joven. No tuvo tiempo de publicar sus resultados pero se los mostró a Descartes, quien sin escrúpulos los hizo pasar como suyos y los presentó por primera vez en 1637 en la *Dioptrique*. Algunos defensores de Descartes, para justificarlo, mencionan que el objetivo que éste tenía, no era sólo la formulación de conceptos totalmente nuevos sino, también, el de reformular leyes concebidas por otros de acuerdo con su método.

Si  $\theta_1$  es el ángulo de incidencia  $A\hat{B}H$  y  $\theta_2$  al ángulo de refracción  $G\hat{B}D$ , la ley de Snell para la refracción se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = n_{1,2}, \quad (2.1)$$

donde  $n_{1,2}$  es una constante, denominada *índice de refracción* de la luz que pasa del medio 1 al 2. Para el aire (medio 1) y el agua (medio 2), se encuentra experimentalmente que  $n_{1,2}=1.3$ . De la ecuación (2.1) se deduce, entonces, que  $\sin \theta_2 < \sin \theta_1$ , o sea  $\theta_2 < \theta_1$ . Esto significa que el rayo refractado, cuando entra en el medio 2, se acerca a la normal a la superficie que pasa por el punto B (ver Fig.2.2). De acuerdo con la ley de Snell cuando mayor es el índice de refracción, mayor es el cambio de la dirección del rayo, o sea, más se acerca a la normal.

Para “explicar” la refracción Descartes supone que, en la superficie del agua, sobre la cual inciden los corpúsculos luminosos, se manifiesta una fuerza, que actúa sobre ellos. Esta fuerza, que actúa solamente en la interfaz aire-agua, produce un cambio de la velocidad de los corpúsculos en la dirección que actúa la fuerza. Esta suposición, es plausible: en el interior de un medio material, un corpúsculo luminoso está rodeado por el mismo material por todos los lados y, por tanto, no es impulsado en ninguna dirección; en cambio, en la superficie, la situación es diferente y puede producirse un impulso sobre los corpúsculos, hacia el exterior o hacia el interior. Si esta fuerza es perpendicular a la superficie del agua y en la dirección hacia adentro, entonces, se

produce un aumento en la velocidad perpendicular de los corpúsculos y, por lo tanto, la trayectoria de los corpúsculos, en el agua, se acerca a la normal. Esta fuerza modifica, la velocidad perpendicular pero no a la componente de la velocidad paralela a la superficie que separa ambos medios. A partir de esta condición, Descartes, encuentra que

$$n_{1,2} = \frac{V_2}{V_1} \quad (2.2)$$

donde  $V_1$  y  $V_2$  son las velocidades de los corpúsculos en el medio 1 y en el medio 2, respectivamente.

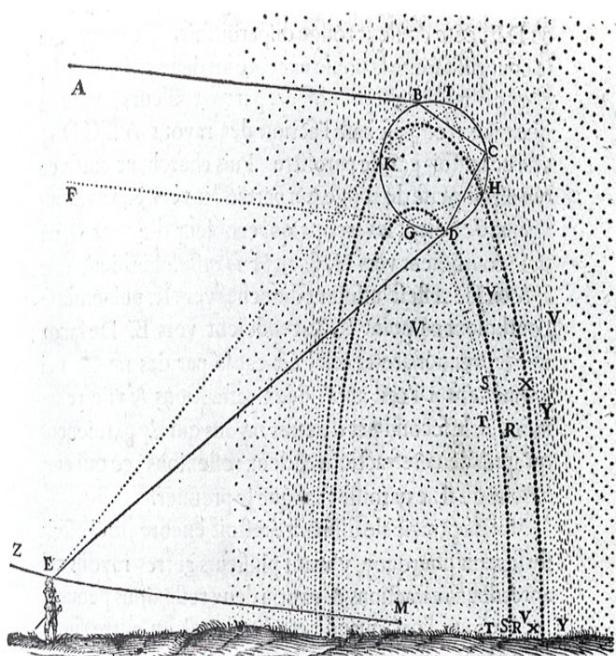
Cuando el rayo de luz pasa del aire al agua el índice de refracción  $n_{1,2} = 1.3$ , entonces, la ecuación (2.2) implica que la velocidad de la luz en el agua  $V_2$  debe ser mayor que la velocidad de la luz en el aire  $V_1$ .

Para Descartes la conclusión de que la luz tiene una velocidad más grande en el agua que en el aire, le resultó algo incómoda. Es interesante repetir algunos de los argumentos que utiliza para justificar su resultado: “[...] y, se puede observar, como una bala pierde mucho más su agitación cuando se topa contra un cuerpo blando, que contra otro que es duro, y que éste se desliza menos fácilmente sobre una alfombra que sobre una mesa muy lisa, así la acción de esta materia sutil (los corpúsculos de luz) puede ser frenada por las partes del aire, que son suaves y mal agrupadas, mucho más que por las partes del agua o las de un vidrio o cristal. De modo, que cuando las pequeñas partes de un cuerpo transparente son más duras y firmes, más fácilmente dejan pasar la luz: porque esta luz no encuentra a ninguna de sus partes fuera de su lugar”. Esta explicación recogió muchas críticas de sus contemporáneos, en especial por parte de Fermat.

La explicación de los colores que hace Descartes es muy original. Supone que la acción de la superficie de separación de dos medios, además de producir la reflexión y la refracción, hace que la luz experimente “[...] un cambio similar al que recibe el movimiento de una pelota cuando se le pega con un efecto liftado”. Descartes imagina que las partículas de materia sutil que encuentran una superficie se meten a rotar como lo hace una pelota de tenis liftada: si la rotación es fuerte se obtiene el rojo y si la rotación es débil se crea el azul. Los otros colores tienen una rotación intermedia. Descartes distingue seis: rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul y violeta. En la figura

se muestra un dibujo hecho por el mismo Descartes, donde explica la aparición de las fuerzas que hacen rotar a los corpúsculos de luz.

Para Descartes, entonces, los colores no son una propiedad intrínseca de la luz, sino que son el resultado de una alteración de la luz blanca producida por la interacción con una superficie material. La experiencia de la formación de colores, cuando un rayo de luz blanca atraviesa un prisma, fue lo que inspiró esta reflexión a Descartes.



**Figura 2.3.** Descartes explicó la formación del arco iris afirmando que se debía a las gotas de lluvia que refractaban y reflejaban la luz del sol. Si bien muchos autores anteriores tenían el mismo concepto básico del arco iris, ninguno de ellos aplicó con tanto rigor la geometría para explicar el fenómeno.

Uno de los logros más importantes de Descartes fue dar una explicación a la formación del arco iris afirmando que se debía a las gotas de lluvia que refractaban la luz del sol. Cuando los corpúsculos incidían sobre la superficie de la gota comenzaban a rotar de la misma manera que cuando incidían sobre la superficie del prisma, produciendo los colores característicos de un arco iris. La luz refractada y, separada en diferentes colores, se refleja en la superficie posterior de la gota de agua, vuelve hacia atrás y se refracta ahora en la interfaz agua-aire y retorna hacia el ojo del observador (Fig.2.3). Utilizando las leyes de reflexión y refracción de Snell, Descartes determinó el recorrido de todos los rayos a través de la gota de lluvia y descubrió que los rayos que vuelven a salir de la gota, para un ángulo particular, emergen casi paralelos entre sí. Esto hace que estos rayos sean lo suficientemente intensos para poder ser observados y distinguidos de los demás. En todos los otros ángulos los rayos que abandonan la gota son divergentes, y esta divergencia los hace tan débiles que no son distinguidos por el observador. El ángulo en el que salen paralelos es de cuarenta y un grados, resultado que está de acuerdo con las observaciones del arco iris.

Descartes explica el color azul del cielo suponiendo que la luz que llega desde el Sol a la Tierra interactúa con las partículas de la atmósfera, lo que hace que los pequeños corpúsculos del éter “*rueden y giren*” antes de llegar a nosotros y “*si el fino material (el éter) no encuentra otras partículas para hacer girar sus pequeñas corpúsculos, sólo podría verse azul*”.

Descartes se sentía muy orgulloso de sus explicaciones sobre los colores alegando que “[...] *coinciden tan perfectamente con la experiencia que no creo que sea posible dudar que el asunto sea como acabo de explicarlo*”. Sin embargo, no respaldó con ninguna otra prueba que el color esté relacionado con el modo de girar de los diminutos corpúsculos de luz. Se sentía impresionado por la concisión y simplicidad de sus hipótesis, por su “*claridad y certeza*” y por su poder explicativo y no reconoció ni insinuó que su razonamiento era puramente especulativo.

Sir Isaac Newton reaccionó vehementemente con esta forma de razonar, pues su propósito era estudiar los fenómenos naturales “*mediante la razón y experimentos*”. Newton fue uno de los protagonistas principales de la revolución científica del siglo XVII. Trabajó en óptica, termodinámica y acústica; pero su lugar en la historia de la ciencia se lo debe sobre todo a su refundación de la mecánica. En su obra más importante, *Principios matemáticos de la filosofía natural* (1687), formuló rigurosamente las tres leyes fundamentales del movimiento.

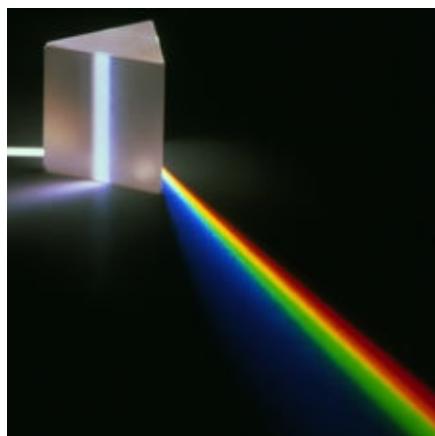
Newton, al igual que Descartes, experimentó con un prisma y también elaboró una teoría para explicar los colores. De esta manera describe uno de sus experimentos:

“*En el año 1665, en el cual me dediqué al pulimento de lentes no esféricas conseguí un prisma triangular de vidrio con el fin de emplearlo en el estudio del notable fenómeno de los colores. Con dicho objeto, habiendo oscurecido mi pieza y hecho un pequeño orificio a las persianas de la ventana para dejar entrar una cantidad conveniente de la luz solar, coloqué mi prisma en la proximidad de la abertura, de modo tal que la luz se refractara en el prisma hacia la pared opuesta. Resultó desde el principio un entretenimiento muy agradable el haber así producido un haz de luz de vívidos e intensos colores*”.

En su vejez, Newton comentaba, que había comprado en 1665 su primer prisma (Fig.2.4) en la feria que se realizaba anualmente en Stourbridge, que estaba a sólo dos kilómetros del Trinity College, Cambridge, donde era un estudiante y más tarde, un

becario. Eran prismas delgados, que tenían botones en el extremo para que puedan ser suspendidos cerca de una fuente de luz blanca, que al atravesar el prisma, producían hermosos colores. Newton tuvo que esperar hasta la otra feria, en 1666, para comprar un segundo prisma que le permitió demostrar su hipótesis sobre los colores. Lo importante de esta historia es que Newton no fue el que descubrió los colores que produce un prisma: su aporte radica en la interpretación analítica que hizo de este fenómeno.

Los experimentos que llevó a cabo con estos dos prismas condujeron a nuestra moderna teoría de la refracción de la luz, al diseño de los telescopios de reflexión y a la total comprensión de la formación del arco iris.

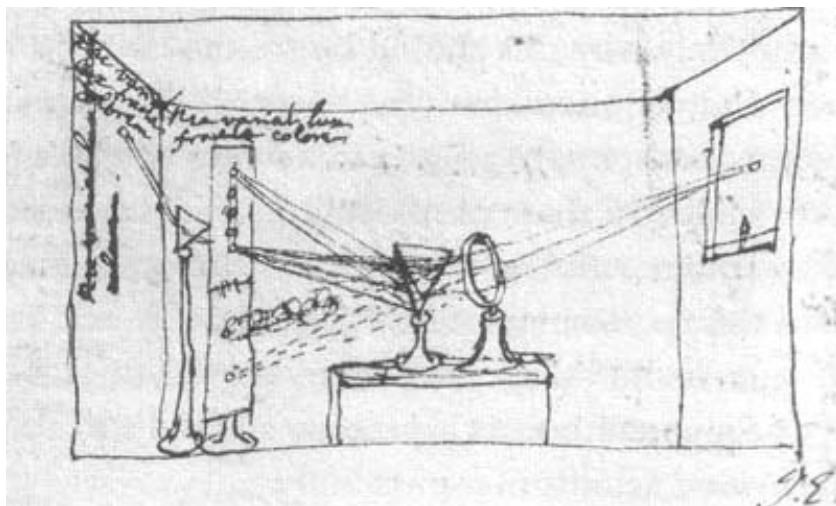


**Figura 2.4.** Los distintos colores que componen la luz blanca se refractan en ángulos diferentes cuando atraviesan un prisma de cristal.

Las investigaciones de Newton sobre la óptica y la luz culminaron con la publicación de su libro, *Opticks*, en 1704. Como él mismo expresó: “[...] *mi intención en este libro no es explicar las propiedades de la luz mediante hipótesis, sino que quiero proponerlas y probarlas mediante la razón y experimentos*”. Como los atomistas antiguos, y al igual que Descartes, Newton consideraba que la luz es un conjunto de pequeñas partículas que viajan a través del vacío. Su explicación de la reflexión y refracción de la luz es muy similar a la proporcionada por Descartes.

Antes de Newton se pensaba que la luz era blanca. Se le podía añadir colores o, como suponía Descartes, los colores se creaban cuando los corpúsculos luminosos de la luz blanca se refractan en la superficie del agua o de un cristal. Newton demostró, sin embargo, que la luz blanca está compuesta de diferentes colores, que es lo que en 1671 denominó “espectro” (del latín, “apariencia” o “aparición”) de la luz. Los distintos colores que componen la luz se refractan en ángulos diferentes cuando atraviesan un prisma de cristal. Esto significa que el índice de refracción toma diferentes valores para diferentes colores. El rayo menos refractado es de color rojo y el más refractado de

color violeta. Entre estos dos extremos, hay una serie continua de colores intermedios que pasan por el naranja, amarillo, verde, azul e índigo. Esta fue una revelación que provocó asombro y controversia hasta bien entrado el siglo XIX. En efecto, *¿Cómo podía ser parte de la luz blanca, el azul o el rojo, que son más oscuros que la propia luz blanca?* Newton reconoció que su hallazgo sobre la naturaleza compuesta de la luz iba en contra de las antiguas suposiciones y del sentido común: *“Yo estoy convencido que esta afirmación parece chocante y que es admitida con mucha dificultad”*. Su análisis trasladó la teoría del color, de los reinos de la filosofía y de la pintura, a los de las matemáticas y la óptica: mostró que el color no es una propiedad inherente de los objetos, como se mantenía desde Aristóteles, sino por el contrario es una ilusión derivada de la respuesta de nuestro sistema visual a las emisiones de luz. *“Porque los rayos, si hablamos correctamente, no son de color[...]”*, afirmó Newton. *“En ellos no hay nada más que un cierto poder y disposición que provoca una sensación de este o aquel color”*. En otras palabras, las rosas no son rojas, el pasto no es verde, el cielo no



**Figura 2.5.** Esquema realizado por el propio Newton para explicar su experiencia de la descomposición de la luz por un prisma

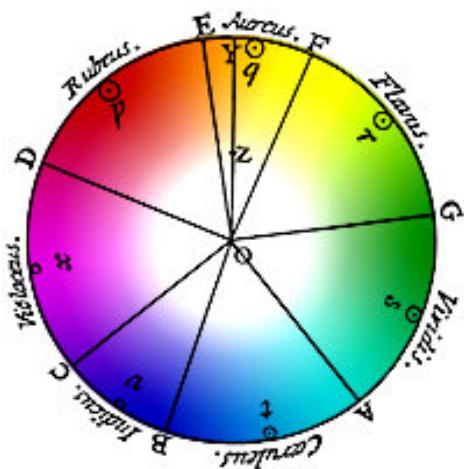
es azul.

La Fig.2.5 es un esquema, realizado por el propio Newton, del montaje óptico que utilizó en su “laboratorio”. La luz entra en la habitación a través de un pequeño orificio en la ventana de la derecha, después atraviesa una lente, de modo tal que si no estuviera el prisma se formaría una imagen del orificio en la parte inferior del tablero de la izquierda. Cuando se coloca el prisma, la luz se refracta y se forma un espectro de colores en la parte superior del tablero. Newton hizo pequeños orificios en el tablero, de forma que lo atravesase sólo uno de los colores refractados. A continuación hace que este “único” color atravesie un segundo prisma colocado detrás del tablero, lo que le permite

demostrar que el prisma desvía su trayectoria, pero en esta segunda refracción no hay dispersión, su color permanece inalterado. En la esquina superior de la figura, Newton escribió. “*Nec variante lux fractal colorem*” (la luz refractada no cambia su color). La luz refractada, de un cierto color, es una luz homogénea, en el sentido de que no puede experimentar una nueva descomposición.

Los experimentos de descomposición de la luz con el prisma le permitieron comprender por qué las imágenes de los telescopios de refracción (que utilizan lentes de cristal) se veían borrosas. Esto le empujó al descubrimiento del telescopio por reflexión, que empleaba espejos, en lugar de lentes, para ampliar las imágenes y evitar así la aberración por refracción. Los principales telescopios astronómicos de hoy en día utilizan este invento de Newton.

Sin embargo, fue la explicación que dio sobre el arco iris, muy superior a la realizada por Descartes, lo que más impresionó a sus contemporáneos. Algunos, como el poeta J. Keats (1795-1821), consideraron que esta explicación, con la que Newton consiguió “*destejer el arco iris*”, fue a costa de una sustracción a la magia y el misterio del mundo.

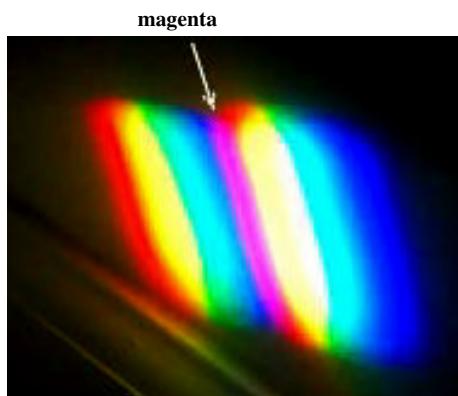


Colores	Notas musicales
Rojo D	Re
Naranja E	Mi
Amarillo F	Fa
Verde G	Sol
Azul A	La
Índigo B	Si
Violeta C	Do

**Figura 2.6.** Círculo de colores y notas musicales

Los siete colores del arco iris tienen una curiosa historia. En realidad todas las longitudes de onda de la luz están presentes en la descomposición de la luz blanca. Newton eligió los colores que causaban mayor efecto a la vista para definir los que formaban partes del espectro. La elección resulta bastante obvia al final de la zona amarillo-naranja del espectro, pero en la zona del azul no resulta tan evidente diferenciar el azul del añil, o del violeta. Además, muchos de estos colores cambian su

aspecto cuando se modifica la luminosidad. El amarillo-naranja se vuelve marrón si la intensidad es baja. La existencia del añil siempre ha sido bastante discutida. En verdad, no se ve como un color aparte y normalmente se argumenta que Newton identificó siete colores primarios en el espectro para hacerlos coincidir con las siete notas de la escala musical (Fig.2.6), una correspondencia que él vio como la confirmación de la armonía divina de la naturaleza. Mientras hacía física experimental, analizando la refracción de la luz a través del prisma, sus supuestos culturales le dictaban el número de colores que se dispersaban.



**Figura 2.7.** Superponiendo la luz difractada por dos prismas se pueden observar los colores que se obtienen mediante la adición de dos colores homogéneos del espectro.

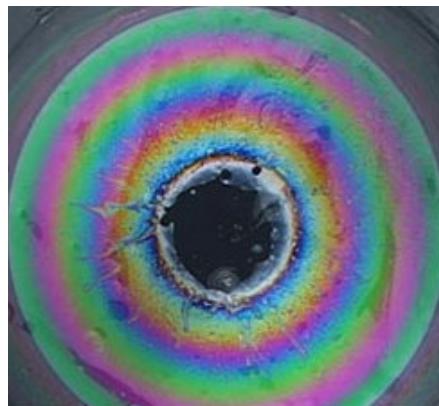
En la visión de Newton, el color “naranja” o “índigo” del espectro era tan primario, homogéneo y simple como la luz “roja” o la “verde”, porque ninguno de estos tonos podían ser alterados o separados, por la refracción a través de un prisma, en otros colores. Pero descubrió que podían ser mezclados. En particular, descubrió nuevos colores que eran ya conocidos en la naturaleza como en piedras preciosas y en flores, pero que no aparecían en el espectro de la luz blanca al pasar por un prisma. Un tono extra espectral – el “púrpura” o el “violeta rojo” (*magenta*) – lo obtuvo superponiendo los colores “rojo” y “violeta”, dispersados por dos prismas como se muestra en la Fig.2.8.

Hoy en día, la descomposición que realizó Newton de la luz blanca, en su espectro de colores compuestos, mediante su sencillo prisma constituye un símbolo del análisis newtoniano del mundo.

Sin embargo, el enigma del color azul del cielo no estaba resuelto: comprender el arco iris o la dispersión de la luz blanca por un prisma no explica por qué el cielo claro es azul y no de ningún otro color del espectro.

En otro de sus experimentos, Newton observó que cuando se comprimía una lente curva contra una sección plana de vidrio aparecían tenues aros circulares concéntricos que ahora llamamos “*anillos de Newton*”. Si se iluminaba la lente con diferentes colores de luz monocromática, la configuración de esos anillos cambiaba de tal modo que “[...] *era muy agradable verlos ensancharse o contraerse de acuerdo con el cambio de color de la luz*”. Además, si se iluminaba la lente oprimida con luz blanca, cada anillo presentaba un espectro semejante a un arco iris, azul en el interior y rojo en la parte exterior. A partir de estas experiencias, Newton dedujo que “[...] *el aire que se encuentra entre los vidrios, de acuerdo con sus distintos espesores, está dispuesto en algunos lugares para reflejar y en otros para transmitir la luz de cualesquiera de los colores*”. En el capítulo 3 vamos a volver sobre los anillos de Newton.

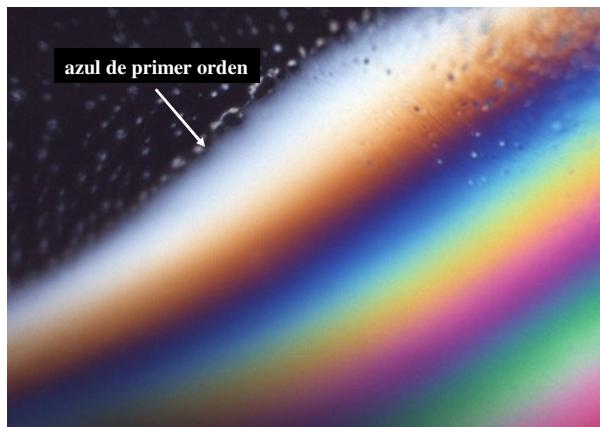
Newton observó también que las burbujas de jabón, cuando cambiaban de espesor, mostraban la misma secuencia de colores que la lente oprimida. Para proteger las burbujas las colocó en una caja de vidrio para observar como surgían los colores como se muestra en la Fig.2.8.



**Figura 2.8.** Colores que se observan en una pompa de jabón semiesférica cuando se la ilumina con luz blanca difusa desde arriba.

“[...] *en un orden muy regular, muchos anillos concéntricos rodean la parte superior de la burbuja. Y cuando la burbuja iba haciéndose más delgada por la continua tendencia del agua a bajar, estos anillos se dilataban lentamente y cubrían la totalidad de la burbuja descendiendo hasta la parte baja, donde se desvanecía sucesivamente. Mientras tanto, después de que todos los colores aparecieron en la cima, en el centro de los anillos se formó una pequeña mancha negra redonda, como la que se ve en la experiencia de la lente prensada, que continuamente se dilataba hasta alcanzar a veces más de 1.5 a 2 centímetros de radio antes de que la burbuja se rompiera*”.

Newton también hizo experiencias con burbujas sostenidas por un aro (Fig.2.9). En las burbujas como en los aros, al color azul que aparecía justo por fuera de la mancha oscura central (en la burbuja) y por debajo de la mancha oscura (en el aro) lo llamó el “azul de primer orden” y conjeturó que “[...] el azul de primer orden, aunque muy débil y fino, posiblemente sea el color de algunas sustancias; y particularmente el color azul de los cielos parece ser de este orden. Pues todos los vapores, cuando comienzan a condensarse y a fusionarse en pequeñas parcelas llegan a ser primero de ese espesor, por lo cual deben reflejar primero ese azul antes de poder formar las nubes y los demás colores. Y siendo éste el primer color que los vapores comienzan a reflejar, éste debería ser el color de los cielos más perfectos y transparentes, en los cuales los vapores aún no han alcanzado el espesor requerido para reflejar otros colores, como hemos visto por experiencia”.



**Figura 2.9.** Los colores de una burbuja de jabón sostenida por un aro.

Newton pensaba entonces que los “vapores” de la atmósfera se condensan en pequeñas “parcelas” o gotitas del tamaño adecuado como para producir el “azul excelente” de un cielo claro.

Voltaire en una exposición sobre las teorías de Newton expresaba: “[...] los vapores más finos que se elevan sobre la Tierra y matizan de color el aire sin nubes, al tener muchas superficies minúsculas, producen este azul celestial, que tanto gratifica a la vista”

Aunque su coronada finalmente no resultó ser cierta, la especulación de Newton abordó una cuestión crucial: por qué el cielo es azul y no de cualquier otro color. Para Descartes, el color de la luz se debe al giro de las partículas del éter y que las partículas que nos llegan en forma más directa del sol son las que giran menos y éstas son las

azules. Newton sabe que esto no es así, puesto que la luz directa del Sol incluye todos los colores y no sólo el azul

La reacción a la especulación de Newton – que el color del cielo se debía a gotitas de muy pequeño espesor suspendidas en el aire – fue un montón de objeciones y propuestas alternativas. En 1716, Johann Caspar Funk señalaba que, para explicar los diferentes colores que tenía el cielo, al atardecer y al mediodía, el tamaño de las gotitas tenía que aumentar o disminuir sin ninguna causa aparente. Alrededor de 1760, J. A. Nollet y J. H. Lambert conjeturaban, por separado, que si de la blanca luz que llega del sol, la Tierra refleja más la parte azul que los otros colores, el cielo debía verse azul. Si así fuera deducía Nollet, desde el espacio exterior, por ejemplo desde la luna, se vería a la Tierra de color azul. En esa época no se pudo verificar experimentalmente esta suposición. Ahora es muy fácil ver una foto de la tierra tomada desde el espacio exterior. ¿De qué color se ve a la Tierra? Vamos a volver sobre esta cuestión en el Capítulo 7.

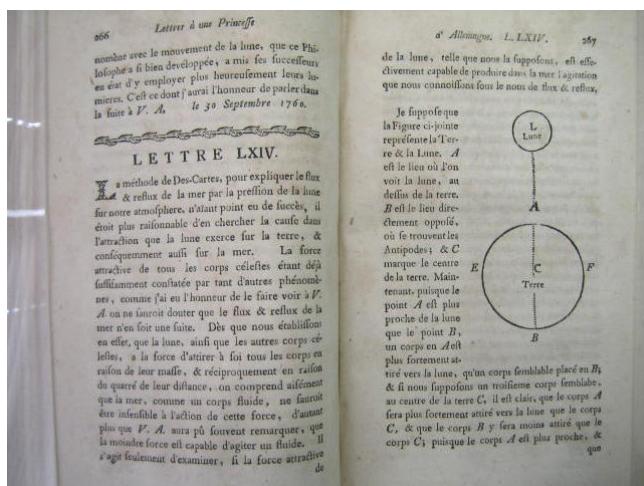
Pierre Bouguer, en 1760, publica su libro donde analiza la atenuación de la luz en la atmósfera, presenta la nueva ciencia de la fotometría y varias maneras de medir la intensidad de la luz radiada. Fue el primero en reconocer que un rayo de luz que pasa a través de la atmósfera va extinguéndose, esto es, haciéndose más tenue a medida que avanza en la atmósfera. Bouguer observa que el brillo de una estrella depende del ángulo en que se encuentre con relación al cenit, esto es, de la cantidad de atmósfera que atraviesa su luz. No explica por qué se produce la atenuación, pero observa que la atmósfera produce “*una separación real de la luz, pues los rayos rojos penetran más profundamente, en tanto que los rayos azules, al tener menos fuerza para atravesar en línea recta, se reflejan mucho más fácilmente*”.

Bouguer fue también el primero en sugerir que las moléculas del aire, por sí mismas, pueden separar la luz por su color. Puesto que carecía de toda explicación sobre cómo sucedía tal cosa, su sugerencia quedó en suspenso durante un siglo, no sólo por desatención, sino a causa de que se formularon otras preguntas profundas: ¿existen realmente las moléculas? y ¿cómo interactúan con la luz? En cambio, J. Lambert (1760) aseveraba que la luz del cielo “*se dispersa por la acción de partículas heterogéneas de las cuales un cuerpo transparente está más o menos contaminado*” y suponía que esas partículas eran ajenas al aire.

Leonhard Euler, el gran matemático del siglo XVIII, expresó sus opiniones acerca del color del cielo en sus *Cartas sobre diferentes temas de la filosofía natural dirigidas a una princesa alemana* (Fig.2.10). Afirmaba que el cielo no es como parece, “una bóveda azul a la que están pegadas las estrellas”; éstas están en cambio a “distancias inconcebibles de nosotros” en un vasto vacío lleno de un sutil éter a través del cual viajan las ondas de luz.

Euler sugiere, al igual que Leonardo Da Vinci, que si ascendemos a grandes alturas sobre la superficie de la Tierra, el aire se volvería gradualmente más enrarecido, la presión descendería y el azul del cielo se desvanecería en una profunda negrura. Euler supone que el aire no puede ser “*un medio perfectamente transparente, como lo es el éter*”, y llega a la conclusión de que la causa del azul es que o bien “*el aire está cargado de una gran cantidad de pequeñas partículas que no son perfectamente transparentes pero que, al ser iluminados por los rayos del sol, reciben de éstos un movimiento de vibración que produce nuevos rayos propios de esas partículas, o bien son opacas y se nos hacen visibles cuando reciben la luz*”. De estas dos alternativas, Euler prefiere la segunda: “*El color de estas partículas es azul, y esto explica el fenómeno: el aire contiene una gran cantidad de pequeñas partículas azules*”.

El color de estas partículas es tan delicado que uno sólo ve el azul profundo cuando observa una gran masa de esas partículas juntas. Euler compara al aire con el agua clara que se ve azul cuando se presenta en grandes cantidades. De la misma manera, una copa de vino tinto parece de un rojo más pálido que el rojo intenso que presenta una botella del mismo vino.



**Figura 2. 10.** Foto del libro de Euler: *Cartas sobre diferentes temas de la filosofía natural dirigidas a una princesa alemana*.

Dos años después, Euler modifica su opinión: mientras que en 1760 sostenía que lo que provoca el color azul eran las impurezas suspendidas en el aire, ahora hacía notar que

“[...] cuando más puro es el aire, tanto más brillante es el esplendor del azul del cielo, lo cual es prueba suficiente de que debemos buscar la razón de ello en la naturaleza de las partículas propias del aire”. Si el color se debiese a las impurezas sería menos intenso en el aire puro y Euler sabe que no es así: “*Las sustancias extrañas, al mezclarse con él aire disminuyen su bello color azul*”. Euler no explica, sin embargo, por qué las partículas propias del aire producían ese efecto ni por qué el color resultante es el azul. Sus “partículas propias” no son moléculas porque Euler cree que la existencia de átomos “*tan pequeños que ya no pueden dividirse*” es “*absolutamente insostenible*”. Euler concibe al mundo como un conjunto de fluidos en movimiento como Descartes. El problema de esta teoría es que no puede explicar por qué el aire continuo dispersa la luz azul y no la roja, salvo que uno recurra a las especulaciones de Descartes sobre las partículas que giran de modos diferentes.

Volvamos a los estudios de Newton con los anillos y las burbujas. En estas experiencias los colores que aparecen varían con la separación entre los vidrios o bien del espesor de la burbuja. ¿Por qué para algunos espesores solo se reflejaba el rojo y para otros el azul? Esto parecía indicar que la luz roja, o la azul, se comportan de manera diferente cuando el espesor cambia su longitud. Pero, ¿qué puede significar la medida de estos espesores si la luz está compuesta por partículas semejantes a puntos que no tienen un tamaño mensurable?

Newton se dio cuenta de que éste era un problema profundo y trató de resolverlo mediante su hipótesis de los “impulsos”: el aire que se encuentra entre los vidrios, de acuerdo con sus distintos espesores, está dispuesto en algunos lugares para reflejar y en otros para transmitir la luz de cualquiera de los colores

Este experimento podría explicarse si a cada color se le asocia una longitud característica. Esta longitud característica asociada con un color es la *longitud de onda*, que aparece naturalmente en una teoría ondulatoria. Éste es un concepto fundamental que está ausente en todas las explicaciones anteriores. Si la luz de un determinado color tiene una determinada longitud de onda, entonces, el enigma del cielo azul puede plantearse de la siguiente forma: a causa de su longitud de onda, la luz azul pasa a través de la atmósfera de modo diferente a la de otros colores. No obstante ésta es sólo la mitad de la historia, pues, ¿por qué la atmósfera trata de manera diferente a la luz azul que a los otros colores?

## La teoría ondulatoria de la luz

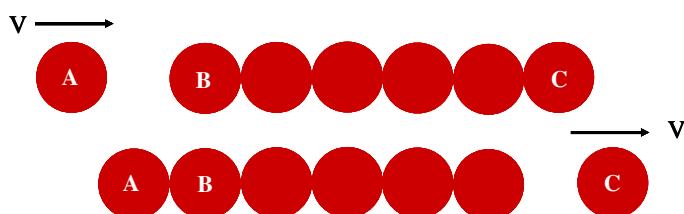
Christian Huygens (1629-1695), discípulo de Descartes y contemporáneo de Newton, en su libro *Treatise on Light* (1669), expone claramente su desacuerdo con la teoría de la emisión corpuscular de Newton con los siguientes argumentos:

“[...] además, si se tiene en cuenta la extrema rapidez con la que la luz se propaga, y cómo, cuando se cruzan en diferentes direcciones, incluso directamente contrarias, los rayos se atraviesan unos con otros sin obstaculizarse, uno puede entender muy bien que cuando vemos un objeto luminoso, no puede ser que la luz nos llegue por medio de algún transporte de materia que viaja hacia nosotros a partir de este objeto, en la forma de una bala o una flecha que atraviesa el aire, [...] es por lo tanto de alguna otra manera que la luz se propaga, y lo que nos puede llevar a comprenderla es el conocimiento que tenemos sobre la propagación del sonido en el aire”.

Pero cuando una onda se propaga, las vibraciones perturban un medio material. La luz del sol que nos ilumina, debe recorrer la distancia que la separa de la Tierra: es necesario entonces que un medio (el éter) llene el espacio intersideral. Huygens, al igual que Descartes, tuvo que postular la existencia de este medio, indispensable para su teoría. “[...] si además, la luz toma un tiempo para viajar de un lugar a otro, se desprende que este movimiento, impreso sobre la materia que se interpone, es progresivo, y consecuentemente se irradia (en todas las direcciones) como el sonido lo hace en ondas y superficies esféricas. Lo llamo ondas por su parecido a las que se forman en el agua cuando una piedra cae en la misma, y que presenta una propagación sucesiva en círculos, a pesar de que estas surgen de otra causa y están solo sobre una superficie plana”.

Una de las principales propiedades de las ondas - los pulsos de ondas se cruzan sin ser perturbados - le proporcionó a Huygens la analogía que lo animó a saltar a una descripción diferente de la propagación de la luz.

¿Cómo imagina Huygens al medio, al éter, en el cual la luz se propaga?: “[...] *debido a la extrema velocidad de la luz, y a otras propiedades que esta tiene, no puedo admitir que la luz se propague como el sonido (a través de compresiones y expansiones del aire) y voy a mostrar aquí la forma en que concibo cómo la luz se propaga*”. Sugiere entonces Huygens la experiencia de colocar esferas muy rígidas de igual tamaño (ver Fig.3.1), a lo largo de una línea recta, de modo que ellas se toquen entre sí. “[...] *entonces, si se golpea con una esfera similar a la primera de estas esferas, el movimiento pasa casi instantáneamente a la última de ellas, la cual se separa de la fila, sin que uno perciba el movimiento de las otras. El movimiento se hace más rápido incrementando la rigidez de las esferas*”. La onda está aquí asociada a pequeñas vibraciones longitudinales que se propagan de B hasta C. La velocidad de esta onda es más grande cuando las esferas son más duras, o más rígidas. El éter de Huygens está compuesto por esferas minúsculas que están en contacto entre si. Para que la velocidad de propagación sea tan alta como la velocidad de la luz que midió Ole Röemer (1644-1710) en el año 1676, Huygens supone que las partículas del éter “[...] *están dotadas de una dureza casi perfecta y de una elasticidad tan grande como nos plazca*”.



**Figura 3.1.** Si un buen jugador de billar tira la bola A sobre una fila de otras bolas en contacto - que van de B hasta C - hace que la última de estas se ponga en movimiento con la misma velocidad que tenía la bola A y sin que las otras se muevan.

El éter de Huygens es muy diferente al éter de Descartes. La luz se propaga a través de choques sucesivos entre pequeñas esferas, pero éstas quedan finalmente en su lugar. No hay movimiento de materia, como lo imaginaban Descartes y Newton, pero sí propagación de energía.

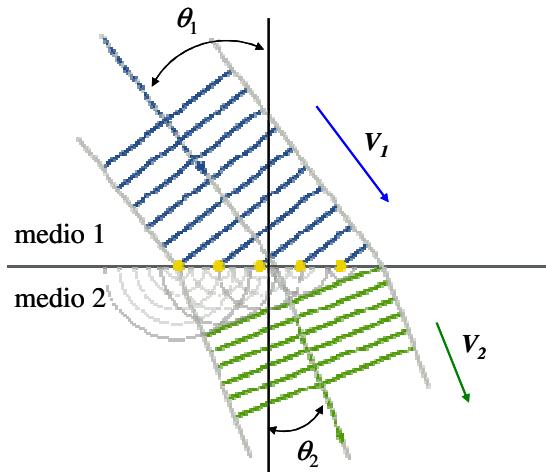
Huygens sugirió que cada punto del espacio que es alcanzado por una perturbación luminosa se convierte en una fuente de onda esférica, y que la suma de todas estas ondas secundarias determina la forma de la onda en cualquier instante posterior.

Utilizando este método Huygens explica la reflexión y la refracción de la luz, la curvatura de una onda que se propaga en un medio no homogéneo, y el fenómeno de doble refracción que tiene lugar en algunos cristales. Aunque no pudo explicar la interferencia y la difracción, este método, conocido ahora como el *Principio de Huygens* es uno de los conceptos fundamentales de la teoría de ondas.

Utilizando el esquema que muestra en la Fig.3.2, Huygens dedujo que la relación entre el ángulo de incidencia  $\theta_1$  y ángulo de refracción  $\theta_2$ , viene dada por

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = n_{1,2} = \frac{V_1}{V_2}, \quad (3.1)$$

donde  $V_1$  y  $V_2$  son las velocidades de las ondas en el medio 1 y en el medio 2. Esta es la expresión de la ley de Snell en el marco de la teoría ondulatoria.



**Figura 3.2.** Diagrama que utilizó Huygens para explicar el fenómeno de refracción. Este esquema se sigue utilizando en los cursos de óptica actuales.

Recordemos que, en el marco del modelo corpuscular de la luz de Descartes y Newton, también se deducía una relación similar a la (3.1), pero el valor del índice de refracción era  $n_{1,2} = V_2/V_1$ . El modelo ondulatorio de Huygens, sin embargo predice que  $n_{1,2} = V_1/V_2$ , es decir, justamente el valor inverso.

Cuando la luz pasa del aire al agua  $\theta_2 < \theta_1$ , el rayo se acerca a la normal. De acuerdo con la ecuación (3.1) deducida por Huygens, la velocidad de la luz en el agua  $V_2$  debe ser menor que la velocidad de la luz en el aire  $V_1$ , que es lo opuesto a lo que predice la teoría corpuscular.

En esa época no se disponía de la tecnología adecuada para medir la velocidad de la luz en el agua. Tuvieron que pasar más de doscientos años para que se realizara esta

medición y se resolviera cuál de estas teorías es la que explica satisfactoriamente la refracción.

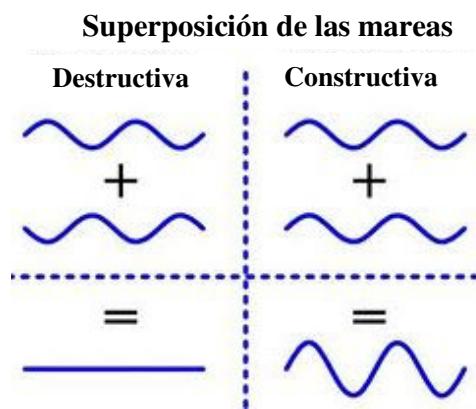
Huygens no atribuyó una frecuencia o periodicidad a sus ondas de luz. Él concibió la luz como una perturbación tipo pulso, y asoció la sensación de luz con cada pulso individual (con la “presión” que el pulso producía en los ojos). Naturalmente, esto le impidió explicar el mecanismo del color, incapacidad que admitió con franqueza en el prefacio de su Tratado: “[...].*confío en que habrá algunos que impulsarán estas investigaciones mucho más allá de lo que he podido hacer, porque el tema no es de los que se agotan fácilmente. Esto es evidente en aquellas partes del tema que he indicado como demasiado difícil para su solución, y más evidente en aquellos asuntos en los que no he tocado nada, como los distintos tipos de cuerpos luminosos y toda la cuestión del color, lo que todavía nadie puede explicar*”.

En aquella época, la teoría ondulatoria de Huygens no fue muy reconocida, fundamentalmente debido al prestigio de Newton, que fue quien instaló la teoría corpuscular. Tuvo que pasar más de un siglo para que la teoría ondulatoria de la luz fuera tomada en cuenta. Los experimentos del médico inglés Thomas Young (1773-1829), sobre los fenómenos de interferencias luminosas, y los del físico francés Auguste Jean Fresnel (1788-1827), sobre la difracción fueron decisivos para ello.

Los comerciantes ingleses, en el siglo XVII, observaron un curioso comportamiento de las mareas en el golfo de Tongkin (hoy Hanoi). El patrón de las mareas ha sido descrito por el viajero inglés F. Davenport en una nota publicada en la revista *Philosophical Transactions* en el año 1684 (el primer ejemplar de esta revista es de marzo de 1665). En esa región nunca hay más de una marea alta al día, y dos veces cada mes lunar, esto es, a intervalos de 14 días, no hay ninguna marea. En los siguientes siete días, la altura de la marea aumenta y llega a su mayor altura cuando la luna está en su máxima declinación.

Esta anormalidad atrajo la atención de la comunidad científica inglesa, y es natural que Newton se haya ocupado del tema en su *Principia* de 1688. Newton atribuyó el patrón de las mareas de Tongkin a la superposición de dos mareas que llegan de diferentes direcciones. Una marea, sugirió, procede del mar de China, con un retraso de 6 horas, y la otra del mar de la India, con un retraso de 12 horas. Cuando ambas tienen la misma amplitud sus efectos se cancelan en la zona del golfo de Tongkin.

A pesar del interés de Newton en los colores de películas delgadas y de estar al tanto de su carácter periódico, no hizo la transposición entre el comportamiento de las mareas de Tongkin con las variaciones de los colores en una burbuja de jabón. Ese salto fue realizado por T. Young y fue recién en 1801 que el concepto de interferencia surgió como un principio aplicable por igual a la interacción de las mareas, a los batidos producidos por la superposición de dos sonidos de casi la misma frecuencia y para los colores de películas delgadas. Este principio - él mismo lo llamó una ley general, - ha demostrado ser el más valioso de los muchos legados de Young a la ciencia.



**Figura 3.3.** Dibujos que utilizaba T. Young para explicar la superposición de las mareas.

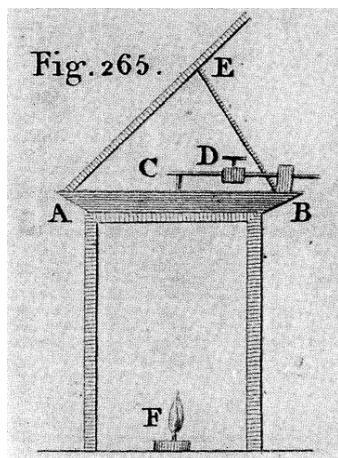
En los manuscritos de sus conferencias realizadas en la *Royal Institution*, Young (1802) explica las anomalías de las mareas en el Golfo de Tongkin mediante la superposición de las mareas componentes y utiliza gráficos como los que se muestran en la Fig.3.3:

“[...] si entran al canal de manera que las elevaciones de una serie coincidan con las de la otra, juntas deben producir una serie de elevaciones simultáneas mayores; pero si las elevaciones de una serie están situadas de manera que coincidan con las depresiones de la otra, entonces éstas deben llenar estas depresiones y la superficie del agua debe permanecer lisa.” A pesar de estar en una de sus clases de hidráulica agrega: “[...] ahora yo sostengo que efectos semejantes tienen lugar siempre que dos porciones de luz se mezclan en esta forma y a esto lo llamo la ley general de la interferencia de luz”.

Young se valió de una bandeja de ondas para descubrir propiedades de las ondas sonoras y las ondas luminosas. En su tratado *Lectures on natural philosophy and the mechanical arts* (1807) hace un dibujo de la bandeja de onda que utilizaba (Fig.3.4).

En ese mismo tratado explica la interferencia de la luz de la siguiente manera: “Suponiendo que la luz de un dado color consiste en ondulaciones de una cierta

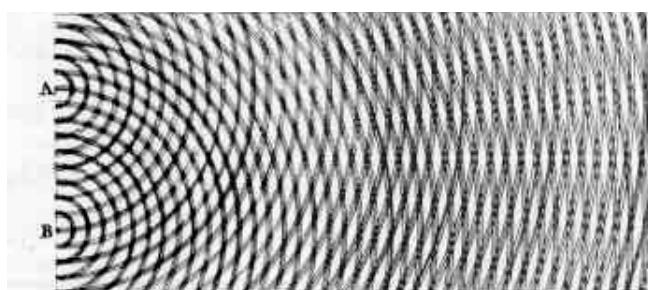
longitud de onda, se sigue que estas ondulaciones pueden dar lugar a los mismos efectos que ya hemos examinado en el caso de las ondas en agua y ondas sonoras. Se ha mostrado que dos series iguales de ondas, que se originan en centros que están próximos entre sí, pueden destruirse uno con el otro en ciertos puntos, mientras que en otros se duplican; y el batido de dos sonidos se puede explicar mediante una interferencia similar. Aplicamos ahora los mismos principios a la superposición y desaparición de los colores.



**Figura 3.4.** Bandeja de ondas utilizada por Young. La figura es una ilustración de su libro.

Para que los efectos de dos porciones de la luz puedan ser combinadas de esta forma, es necesario que salgan del mismo origen, y que lleguen al mismo punto por diferentes caminos, en direcciones que no se aparten mucho entre sí.

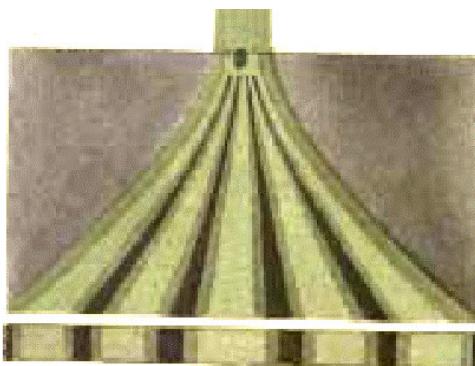
Los caminos diferentes pueden producirse en una o en ambas de las porciones difractadas, por reflexión, refracción, o por cualquiera de estos efectos combinados, pero el caso más simple parece ser, cuando una luz homogénea cae sobre una pantalla en la que hay dos agujeros muy pequeños o dos rendijas muy finas, que pueden ser considerados como centros de divergencia, desde donde la luz se difracta en todas las direcciones.



*Cuando los dos nuevos haces de luz así formados, son recibidos sobre una pantalla plana que los intercepta, se encuentra que la luz está dividida por franjas oscuras en porciones casi iguales, pero resultando más ancha cuando la pantalla se aleja de las aberturas, de modo que subtienden ángulos casi iguales desde las aberturas en todas las direcciones. Se ensanchan también en la misma proporción cuando las aberturas se acercan entre sí. El medio de las dos porciones está siempre iluminado”.*

*“El medio de las dos porciones es siempre brillante y las franjas brillantes que están a cada lado están en distancias tales que la luz que le llega de una de las aberturas debe haber recorrido una distancia que es más larga que la que le viene de la otra en una longitud de dos, tres o más longitudes de onda, mientras que las zonas oscuras corresponden a una diferencia de camino de una media, tres media o más longitudes de onda. Comparando los resultados de varios experimentos, se puede estimar que la longitud de onda de la luz roja extrema en el aire es de aproximadamente 1/36000 pulgadas y la del violeta extremo 1/60000 pulgadas”.*

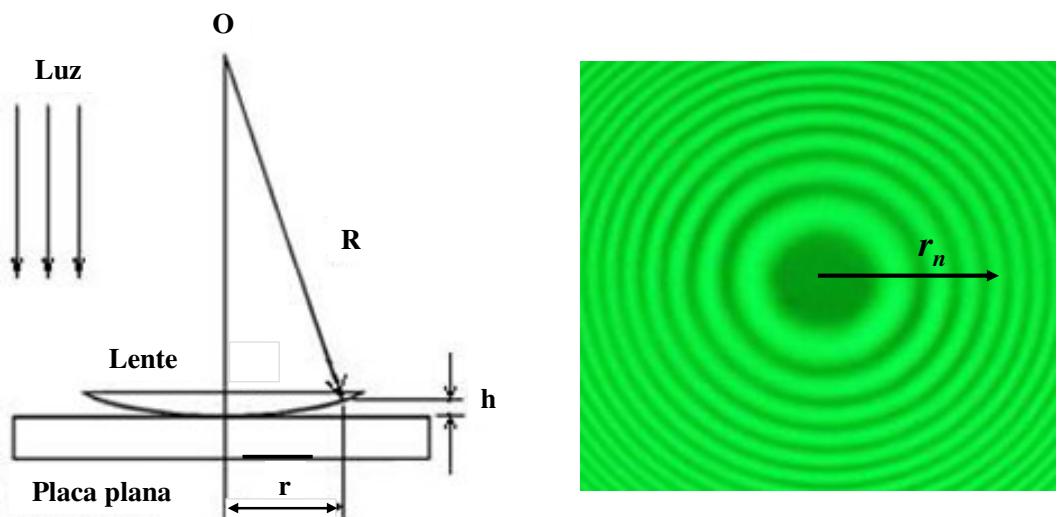
Para ilustrar el fenómeno de interferencia de dos ondas, Young remitía a sus lectores a la Fig.3.5, que utilizaba en sus clases sobre hidráulica para mostrar el patrón de interferencia que se produce cuando “*se tiran simultáneamente dos piedras iguales en un estanque*”. En la Fig.3.6 se muestra un dibujo del diagrama de interferencia que obtuvo haciendo pasar un haz de luz por dos ranuras.



**Figura 3.6.** Ilustración de Young del diagrama de interferencia de dos fuentes. Los originales son de color verde y negro.

Young, en sus deducciones, supone que la luz de un cierto color se comporta como una onda armónica sinusoidal. Esta especulación, que fue formulada por Euler y apropiada por Young, resultó ser un paso decisivo en la interpretación de la luz como una onda. No solamente explica una de las cualidades de la luz, sus colores, sino también le permitió a Young, superponiendo dos ondas armónicas, descubrir el principio de interferencia.

La teoría ondulatoria le asigna a cada color una longitud de onda, que Young pudo medir mediante su experimento de la interferencia de la luz que pasa por dos rendijas. Sus mediciones le asignan, una longitud de onda de  $0.69 \times 10^{-6} \text{ m} = 0.69 \mu\text{m}$  a la luz roja y de  $0.41 \times 10^{-6} \text{ m} = 0.41 \mu\text{m}$  a la luz violeta. Estos valores son muy próximos a los valores medidos actualmente. Para una longitud de onda en la zona media del espectro, del orden de  $\lambda = 0.41 \times 10^{-6} \text{ m} = 0.41 \mu\text{m}$ , y utilizando el valor de la velocidad de la luz medida por Roemer (aproximadamente,  $c = 220000 \text{ Km/s}$ ) encuentra que el periodo de la onda es  $T \approx 2 \times 10^{-15} \text{ s}$  y su frecuencia,  $f \approx 500 \times 10^{12} \text{ ciclos/s}$ . Este valor de la frecuencia es increíblemente grande, sin embargo, toda su sorpresa la expresa en este pequeño comentario “[...] casi 500 millones de millones de longitudes de onda de estas ondulaciones entran en el ojo en un segundo”.



**Figura 3.7.** A la izquierda se muestra un esquema del dispositivo experimental que muestra la lente y la placa plana. La luz incide normalmente sobre la lente. A la derecha se muestra lo que se observa desde O cuando se ilumina con luz monocromática verde.

Antes que Young con sus dos ranuras, Newton, en el fenómeno conocido ahora como *anillos de Newton*, ya encontró franjas periódicas, coloreadas y oscuras, en experimentos relacionados con la luz, como mencionamos en el Capítulo 2. En la Fig.3.7, a la derecha, se muestra el aspecto que tienen estos anillos, en una experiencia actual, en la que se ilumina el dispositivo que se muestra a la izquierda, con luz monocromática de un láser verde, y se observa la luz reflejada.

Newton, que ha sido un gran experimentador, midió con mucha precisión los radios de los anillos brillantes, de diferentes colores y utilizando lentes de diferentes radios de

curvatura. Young pudo explicar el fenómeno de los anillos de Newton como un fenómeno de interferencia y pudo calcular los radios de los anillos brillantes (interferencia constructiva) en función de la longitud de onda de la luz y el radio de curvatura  $R$  de la lente. Suponiendo que la luz que incide sobre la lente es una onda de longitud de onda  $\lambda$ , dedujo que el radio del enésimo anillo brillante  $r_n$  está relacionado con el radio de curvatura  $R$  de la lente y la longitud de onda  $\lambda$  mediante la siguiente ecuación:

$$r_n = [(n+1/2)\lambda R]^{1/2} \quad n=1,2,3,\dots$$

Conociendo los valores de  $r_n$  y  $R$ , esta ecuación le permitió a Young calcular la longitud de onda de la luz. Los resultados que obtuvo coincidían bastante bien con las longitudes de ondas que midió con su experimento de las dos rendijas.

Young nunca publicó un trabajo en el que explicara claramente cómo era el dispositivo experimental con el que realizó su famosa experiencia de interferencia de las dos rendijas. Sin embargo, su teoría sobre la interferencia se vio reforzada por la coincidencia cuantitativa entre sus mediciones y las mediciones realizadas por Newton en el fenómeno de los anillos.

En el año 1826, Fresnel mostró que el principio de Huygens, junto con el principio de interferencia formulado por Young, podía explicar tanto la propagación rectilínea de la luz como la *difracción*. La palabra difracción se utiliza para describir diferentes fenómenos que tienen lugar cuando la luz encuentra un obstáculo.



**Figura 3.8.** Difracción de un rayo de luz láser por una aguja.

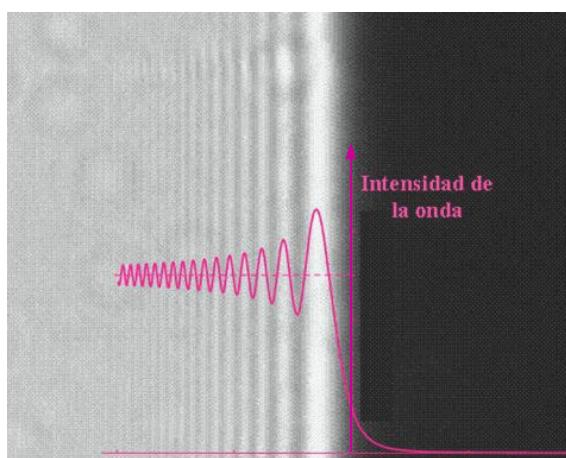
Los efectos de un obstáculo sobre la luz fueron observados por Francesco María Grimaldi (1618-1663), quien acuñó el término difracción (del latín, “*diffingere: romperse en pedazos*”), para describir la división de la luz en diferentes direcciones después de pasar por el borde de un obstáculo. Newton estudió estos fenómenos y los

atribuyó a la *inflexión de los rayos de luz* debido a una fuerza entre el obstáculo y los corpúsculos de luz.

Fresnel pudo explicar la difracción y otros fenómenos luminosos utilizando las teorías de Huygens y de Young. Fresnel reconoce que fue Young el primero en introducir el principio de interferencia, pero que lo hizo solamente para un sistema de dos ondas y no para un número cualquiera de ondas, incluso infinito, que es lo que él proyectaba hacer.

Luego de calcular la superposición, en un punto cualquiera del espacio, de las ondas armónicas producidas por un número arbitrario de fuentes luminosas se propone resolver el problema de difracción: “...después de haber indicado la manera de determinar la resultante de un número cualquiera de ondas luminosas, voy a mostrar cómo, con la ayuda de las fórmulas de interferencia y del principio de Huygens, es posible explicar y aun calcular todos los fenómenos de difracción. Este principio, que me parece una consecuencia rigurosa de la hipótesis fundamental, puede enunciarse así: Las vibraciones de una onda luminosa, en cada uno de sus puntos, pueden ser consideradas como la suma de los movimientos elementales que allí enviarían en el mismo instante, todas las partes de esta onda considerada, en una cualquiera de sus posiciones anteriores”.

“...es por la consideración de estas ondas elementales que Huygens ha explicado de una manera simple las leyes de la reflexión y de la refracción. Pero a su explicación le faltaba algo. El no había podido mostrar como se llega a un solo sistema de ondas a partir de esta multitud de sistemas de ondas elementales, porque no había considerado el principio de interferencia, ...esto le ha hecho creer que la luz no podía desviarse hacia la sombra y le ha impedido explicar los fenómenos de difracción”.

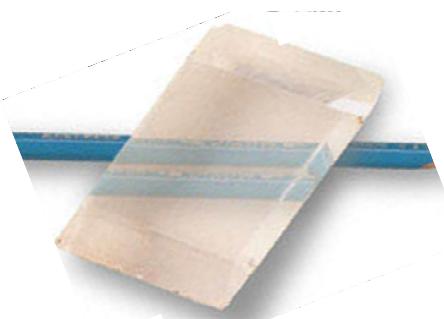


**Figura 3.9.** Fotografía de la difracción por un canto recto superpuesta con los resultados teóricos de Fresnel.

En la Fig.3.9 se muestra una fotografía de la difracción de la luz por un canto recto, y superpuesta sobre la misma, la predicción de la intensidad de la luz difractada según la teoría de Fresnel. El acuerdo es sorprendente.

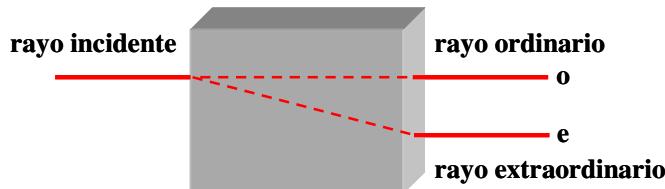
La teoría ondulatoria explica la reflexión, refracción, interferencia por dos ranuras, los colores de la pompa de jabón y los fenómenos de difracción. Pero, hay otra importante propiedad de la luz, que ahora llamamos *polarización*, que requería una explicación por parte de la teoría ondulatoria o la corpuscular. En el año 1669 una expedición naval holandesa a Islandia descubrió una sustancia cristalina transparente, hoy conocida como calcita, a la que denominaron “cristal de Islandia”, que tenía propiedades ópticas muy curiosas.

Los rayos de luz que pasan a través de esta calcita se dividen en dos rayos refractados. Parte del haz incidente siempre se refracta en el ángulo normal de refracción de la sustancia, para un determinado ángulo de incidencia, pero parte del haz incidente se refracta en un ángulo diferente.



**Figura 3.10.** El fenómeno de doble refracción a través de un cristal de Islandia.

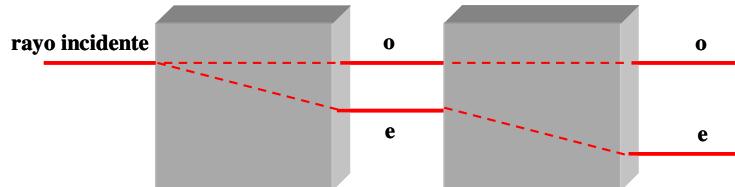
Christian Huygens había deducido la ley ordinaria de la refracción de la luz mediante su teoría ondulatoria. En la teoría ondulatoria de Huygens la velocidad de propagación es diferente en las diferentes sustancias, pero en una dada sustancia su velocidad es independiente de la dirección de propagación.



**Figura 3.11.** Los rayos ordinario y extraordinario en el fenómeno de doble refracción.

Cuando Huygens se enteró de la doble refracción en el cristal de Islandia llegó a la conclusión de que este cristal debe contener dos medios diferentes entremezclados, y que la velocidad de la luz en cada uno de esos medios es diferente. No pudo explicar por qué parte de la luz se propagaba en uno los medios y parte en el otro.

Newton juzgaba que este fenómeno no se podía explicar "si se supone que la luz es el movimiento de variaciones de presión o a través de un éter", es decir, si la luz era una onda longitudinal, y argumentó que "la refracción inusual se tiene que deber a una

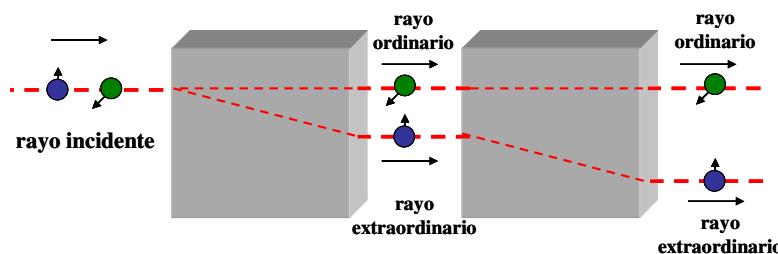


**Figura 3.12.** Cuando los rayos, ordinario y extraordinario, vuelven a pasar por otro cristal no se produce la doble refracción.

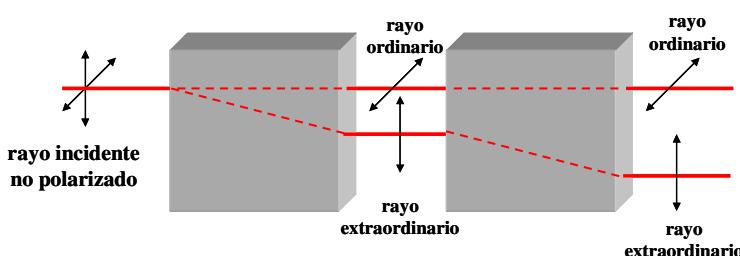
propiedad de los rayos", esto es, supuso que los corpúsculos de luz individuales poseían una asimetría transversal a la dirección de propagación, que produce que en ciertos cristales la velocidad de los mismos dependan de la orientación de esa asimetría.

Huygens descubrió otro fenómeno que es aún más difícil de conciliar con la teoría ondulatoria longitudinal para la luz. Encontró que cuando a un rayo de luz, después de pasar a través de un cristal de Islandia, se le hace pasar a través de un segundo cristal alineado en paralelo con el primero, entonces el rayo ordinario pasa a través del segundo cristal sin refracción mientras que el rayo extraordinario se refracta en el segundo cristal de la misma manera que lo hizo en el primero. Este fenómeno parecía dar la razón a Newton, vale decir, que la doble refracción se debe a una propiedad de los corpúsculos de la luz.

La explicación para Newton, que se esquematiza en la Fig.3.13 sería así: el primer cristal separa a los diferentes corpúsculos de luz en el rayo ordinario y el extraordinario. Cada uno de estos rayos están ahora formados por corpúsculos del mismo tipo, y al pasar nuevamente por otro cristal no se produce la doble refracción.



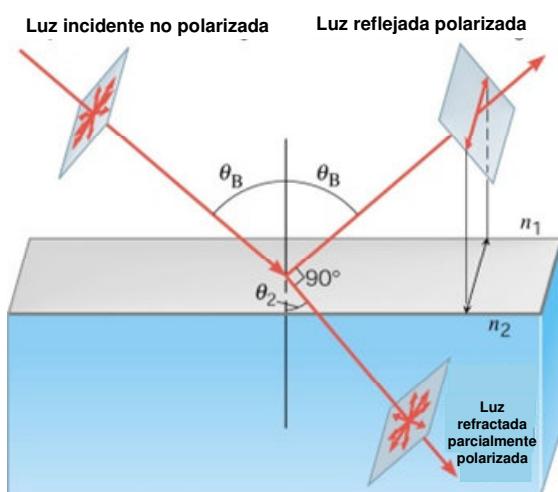
**Figura 3.13.** Explicación de la doble refracción utilizando la teoría corpuscular



**Figura 3.14.** Explicación de la doble refracción suponiendo que la luz es una onda transversal.

En el año 1812, Fresnel repite el experimento de Young, haciendo pasar por una de las ranuras el rayo ordinario y por la otra el rayo extraordinario y no observa la interferencia. Fresnel le comunica a Young este resultado negativo y éste le sugiere que se lo puede explicar en el marco de la teoría ondulatoria si se supone que las ondas son transversales. Las ondas en cuerdas son el ejemplo más simple de estas ondas transversales. Los puntos de la cuerda, (el medio de propagación en este caso), se mueven perpendicularmente a la dirección de propagación. Si la amplitud de vibración de la onda se realiza siempre en una dirección, se dice que la onda está linealmente polarizada. Un estado de polarización cualquiera de la onda es una combinación lineal de dos polarizaciones. Según Young, los rayos ordinarios y extraordinarios tienen diferente polarización, en particular, sus polarizaciones son perpendiculares. Esto le permitió explicar el fenómeno de la doble refracción como se muestra en la Fig.3.14.

Esta hipótesis de Young también explica por qué Fresnel no observó la interferencia de estas ondas: si se superponen en un punto dos ondas de diferente polarización, aun cuando estén en oposición de fase, no se pueden anular entre sí. La teoría ondulatoria, al igual que la corpuscular, le adjudica al rayo, a la onda en este caso, una asimetría transversal en la dirección de la propagación. En un fluido, como el aire o el agua, no pueden propagarse ondas transversales: esto implica que el éter debía comportarse como un sólido, una idea un poco extraña que fue muy criticada por sus contemporáneos.



**Figura 3.15.** Obtención de luz polarizada por reflexión.

E. L. Malus (1775-1812) y Brewster (1781-1868) produjeron luz polarizada haciendo reflejar un haz de luz en la superficie de un dieléctrico. En la Fig.3.15 se muestra la superficie de un dieléctrico, por ejemplo agua, sobre la cual incide luz no polarizada

proveniente del aire. Por las leyes de Snell, sabemos que el ángulo de incidencia (ángulo que forma el rayo incidente con la normal a la superficie en el punto de incidencia) es igual al ángulo de reflexión (ángulo entre el rayo reflejado y la normal). Brewster demostró que para un cierto ángulo de incidencia, llamado “ángulo de Brewster”  $\theta_B$ , tal que  $\tan \theta_B = n_2/n_1$ , donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción del aire y del agua respectivamente, la luz reflejada está linealmente polarizada. Sus vibraciones son solamente paralelas a la superficie del agua. Para ángulos de incidencia, diferentes al ángulo de Brewster, la onda reflejada está sólo parcialmente polarizada (esto es, la polarización dominante es en la dirección paralela a la superficie).

La luz del sol que se refleja en el suelo se vuelve, en parte, horizontalmente polarizada: por lo tanto, los lentes de sol polarizados, diseñados para admitir sólo la luz verticalmente polarizada, bloquean el resplandor que está horizontalmente polarizado: si se rota la lente se observa una variación en la luz transmitida. La luz que proviene de una lamparita incandescente no está polarizada. Si rotamos la lente de sol no se observa ninguna diferencia en la luz transmitida.

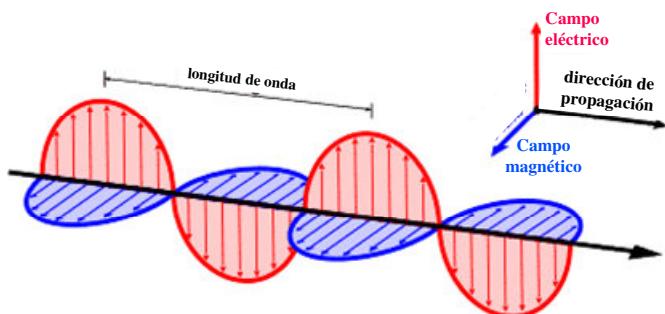
F.Arago (1786-1853) en el año 1848 sugirió a dos notables físicos experimentales, H. L.Fizeau (1819-1896) y J.B.L.Foucault (1819-1868) que midieran la velocidad de la luz con un experimento realizado en la tierra. La única medición de esta velocidad había sido realizada por Römer usando las lunas de Júpiter. Arago estaba muy interesado en saber si la luz viaja más lenta o más rápidamente en el agua que en el aire, ya que consideraba que esta información sería una prueba crucial en la definición de la controversia acerca de si la luz eran ondas o corpúsculos.

Tanto Fizeau como Foucault tenían sus propias ideas sobre cómo proceder y sólo trabajaron juntos durante un tiempo. En 1850, Fizeau realizó la primera medición exitosa terrestre de la velocidad de la luz. El valor que encontró no difería mucho del que había obtenido Römer con su medición astronómica.

También en el año 1850, Foucault demuestra que la luz viaja más lentamente en el agua que en el aire. Fizeau confirmó este resultado siete semanas más tarde.

En el año 1865, J. C. Maxwell formula una teoría en la que sintetiza las leyes de Gauss de la electricidad y del magnetismo, la ley de Faraday y la ley de Ampère, con la corriente de desplazamiento incluida. Estas ecuaciones son conocidas ahora como *ecuaciones de Maxwell* y son una expresión de la hermosa unidad del

electromagnetismo. A partir de estas ecuaciones, Maxwell demuestra que las interacciones entre los campos eléctricos y magnéticos, dan lugar a una onda electromagnética, augurando de esta manera el fenómeno de radiación electromagnética. En esta onda, los dos campos, eléctrico y magnético, son perpendiculares entre sí, y a la dirección común de propagación, como se muestra en la Fig.3.16. Reveló, además, que la velocidad de propagación de estas ondas coincide con la velocidad de la luz. Esta fue la primera evidencia de que la luz es una onda electromagnética transversal. Como es muy difícil concebir que una onda se propague en el vacío sin ningún medio material que hiciera de soporte, Maxwell postuló que la luz podría estar propagándose sobre una sustancia material, a la que también le dio el



**Figura 3.16.** En una onda electromagnética, los campos eléctrico y magnético son perpendiculares entre sí y ambos perpendiculares a la dirección de propagación.

nombre de éter, debido a algunas similitudes superficiales con las hipotéticas substancias introducidas por Aristóteles, Descartes, Newton y Huygens entre otros.

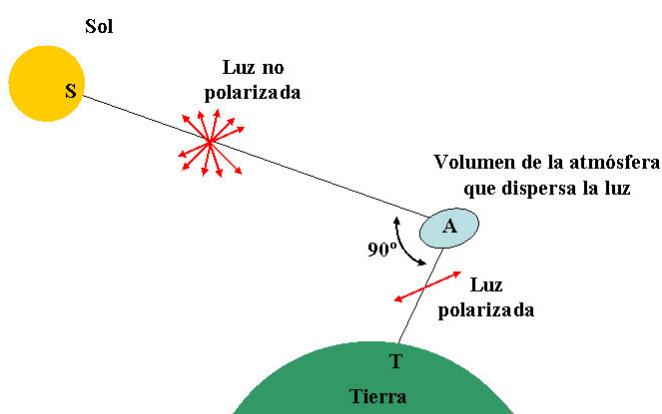
A partir de la teoría de Maxwell y los resultados de los experimentos de Fizeau y Foucault, la comunidad científica, después de más de 200 años de controversias, acordó su veredicto a favor de la teoría ondulatoria de la luz. El problema para nosotros es ahora: ¿cómo utilizar la teoría ondulatoria de la luz para explicar el azul del cielo? ¿cómo interactúa la luz con la materia? y ¿por qué esta interacción da como resultado el color azul? Una contribución importante de la teoría ondulatoria es que le confiere a la luz, de un cierto color, una longitud de onda definida. Esto permitirá comparar, el tamaño de la partícula dispersora, con la longitud de onda de la luz. Es probable que esta interacción onda-partícula, dependa de la razón entre estas dos magnitudes.

No obstante, la historia de la búsqueda de una teoría que explique la naturaleza de la luz no terminó aquí. Desde los comienzos del siglo XX, el problema de optar entre corpúsculos y ondas se ha planteado nuevamente, pero, esta vez, de una manera más intrincada y profunda.

## 4

### Los azules de Tyndall y Rayleigh

En 1811, F. Arago (1786-1853) notó que la luz dispersada por la atmósfera estaba linealmente polarizada en ciertos ángulos de observación como se muestra en la Fig. 4.1. En esta figura el haz de luz, SA, va directamente del sol hacia una pequeña porción de la atmósfera A. La luz directa del sol no está polarizada. Se muestra también un rayo de luz “reflejado”, AT, por esa porción de la atmósfera, en una dirección normal a SA. Arago encontró que la polarización de esta luz reflejada, es normal al plano definido por el rayo que proviene del sol y el rayo reflejado. La atmósfera “dispersa” también en otras direcciones pero, en estos casos, la luz está parcialmente polarizada. En particular el rayo que sigue de largo, que no se muestra en la figura, no está polarizado. Mayores detalles se pueden observar en la Fig.4.1.



**Figura 4.1.** El haz de luz SA, que viene directamente del sol, no está polarizado, es dispersado por una pequeña porción de la atmósfera A. El rayo dispersado en la dirección AT (normal a SA) está linealmente polarizado. Su dirección de polarización es normal al plano “principal” definido por los segmentos SA y AT.

Este descubrimiento, asociado con el experimento de Brewster, parecía confirmar que la luz azul proveniente del cielo, es la luz solar “reflejada” sobre la superficie de gotitas de agua suspendidas en la atmósfera.

En 1860, G. Govi, hizo experimentos con la luz dispersada por diversos tipos de humo. Dirigió un brillante rayo de luz solar a través de un pequeño orificio en el interior de una habitación oscura llena de humo de incienso. Observó entonces que la luz dispersada por el humo, no solamente era azul, (esto ya se sabía por lo menos desde los tiempos de Leonardo), sino que también estaba polarizada. La luz dispersada, en un ángulo de  $90^\circ$  del rayo incidente, tenía una fuerte polarización, exactamente como ocurre con la luz dispersada por la atmósfera, que alcanza su mayor polarización a  $90^\circ$  del rayo que proviene del sol. Podemos ilustrar el experimento de Govi también con la Fig.4.1, si reemplazamos la palabra atmósfera por la de humo. Govi repitió el experimento con humo de tabaco y obtuvo los mismos resultados, lo cual le indicó que el fenómeno no dependía de la composición del humo. En la Fig.4.2 se muestra la luz dispersada por humo de tabaco.



**Figura 4.2.** La luz dispersada por el humo de tabaco, cuando es iluminada con luz blanca, es de color azul y está polarizada de la misma manera que la luz dispersada por la atmósfera.

El experimento de Govi sugería que la “reflexión” producida por partículas pequeñas podía explicar la causa del color azul del cielo incluida su polarización. Sin embargo, hizo notar que la reflexión de la luz del sol por la superficie de pequeñas partículas (por ejemplo, de agua) no podía explicar la polarización de la luz dispersada, pues si la dirección entre el rayo incidente y el reflejado es de  $90^\circ$ , esto significa que el ángulo de incidencia (igual al ángulo de reflexión) debe ser de  $45^\circ$ . En este caso, la tangente del ángulo de Brewster es igual a 1, esto es,  $\tan \theta_B = 1$ , por lo tanto, el índice de refracción de la partícula tendría que ser igual a la del aire, esto es,  $n_1 = n_2$ , de acuerdo a la ecuación  $\tan \theta_B = n_2/n_1$  (ver definición del ángulo Brewster en el Capítulo 3). Este

resultado es absurdo. Las partículas de humo dispersan la luz y la polarizan, pero la luz que dispersa el humo no es causada por una *reflexión* en las partículas del humo. El problema entonces consiste en saber cómo estas partículas causan la dispersión de la luz. Este es también el camino para comprender la pureza del cielo azul.

A mediados del siglo XIX el azul del cielo había llegado a representar un verdadero misterio. Si la causa de ese color eran las partículas suspendidas en el aire, ¿de qué podían ser esas partículas? ¿Podían ser de agua? Sólo el 2%, como máximo, del volumen de la atmósfera es vapor gaseoso de agua, en comparación con el 1% del gas inerte argón. Una fracción tan insignificante no puede, razonablemente, ser la causa del color azul. En la atmósfera hay una cantidad variable de diminutas gotas de agua, pero en los días cálidos y secos, cuando a menudo el sol es de un azul profundo, esas gotitas se evaporarían. Los experimentos de Govi sugerían la presencia de algún tipo de humo dividido en partículas. Aun así ¿por qué las atmósferas creadas por Govi se veían azules y no de cualquier otro color?

El astrónomo John Herschel (1792-1871), en una carta dirigida al físico John Tyndall (1820-1893), manifestaba su desconcierto por la dificultad de explicar el color del cielo y la polarización de la luz:

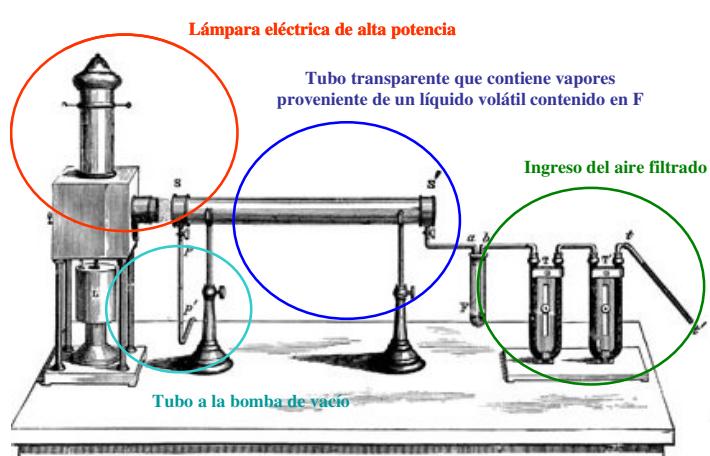
*“[...] la causa de la polarización es, evidentemente, una reflexión de la luz sobre algo. La cuestión es ¿sobre qué? Si el ángulo de la máxima polarización es de 106°, deberíamos considerar que el cuerpo reflectante es agua o hielo, aunque es inconcebible la existencia, en un cálido día de verano, de gotitas de agua no evaporadas en la atmósfera. Pero aunque alguna vez sostuvimos esa opinión, la observación atenta nos ha convencido de que el ángulo de máxima polarización es de 90° y, por consiguiente - independientemente del cuerpo sobre el cual se ha reflejado la luz - , si la luz es polarizada por una única reflexión, el ángulo de incidencia debe ser de 45° y el índice de refracción, que es la tangente de ese ángulo, debe ser la unidad; en otras palabras, la reflexión debería darse en el aire, ¡sobre el aire!”*

Herschel hace notar también que “[...] sólo cuando la pureza del cielo azul es absoluta, la polarización se desarrolla en su grado más elevado y por tanto, cuando hay la más leve tendencia a la formación de nubes, queda materialmente invalidada.” Esta es una observación elemental pero devastadora. Si el más leve manchón de nube disminuye la polarización del cielo y también su perfecto azul, evidentemente las gotas de agua presentes en la atmósfera no pueden ser la causa ni de una ni de otra. Teniendo presente

estos comentarios de Herschel, no resulta asombroso que en 1869 Tyndall escribiera que “[...] el color azul del cielo y la polarización de la luz solar constituyen, en opinión de nuestras autoridades más eminentes, los dos enigmas eternos de la meteorología”.

Tyndall comenzó por investigar si otros aerosoles – partículas suspendidas en el aire – además del humo podían mostrar una luz azul. En 1868 advirtió que cuando hacía incidir luz en sus tinieblas artificiales, emergía una luz color azul. En su cuaderno de apuntes anotó que debía acordarse de “conectar este azul con el color del cielo”. Poco después apuntó:

“Me gustó [...] poder determinar si, en todo su aspecto y en todos los fenómenos, la luz azul era idéntica a la luz del cielo. Aparentemente esto es así hasta en los más mínimos detalles. Las incipientes nubes actínicas son, en efecto, porciones de cielo artificial y ofrecen una demostración experimental del cielo verdadero.” La palabra *actínica* que utiliza proviene del griego *actis*: “sol” e *ica*: “relativo a”, esto es, su significado es: “relacionado con los rayos del sol”.



**Figura 4.3.** Equipo que utilizó Tyndall para crear un “cielo artificial” en el interior de un cilindro de vidrio de 90 cm de largo por 7 cm de diámetro. El tubo se llenaba con mezclas de varios gases diluidos e iluminados con un fino rayo procedente de una potente lámpara eléctrica. El tubo estaba conectado a una bomba de vacío y otros dispositivos que permitían el ingreso de aire y otros gases mezclados con impurezas de diverso tipo.

Tyndall utilizó un cilindro de vidrio de 90 cm de largo por 7 cm de diámetro, que llenó con mezclas de aire y varios gases diluidos que iluminaba con un fino rayo procedente de una de las nuevas y potentes lámparas eléctricas. Tyndall encontró un color azul cielo con muchas sustancias: dióxido de carbono, benceno, nitrito de butano, entre otras. Tyndall estaba maravillado con los colores azules que obtenía, un color que “[...] rivaliza con el del más profundo y puro cielo italiano, si no lo supera.” Esta luz azul salía de la botella en ángulos rectos respecto de la dirección incidente del rayo. Al mismo tiempo, la luz que salía en el otro extremo del tubo era de un anaranjado amarillento, que se podía interpretar como los colores del ocaso.

En algunos de sus experimentos Tyndall añadía continuamente diferentes sustancias que se mezclaban con el aire, en el interior del cilindro. Encontraba, entonces, que el delicado color azul de su botella era transitorio. Después de unos pocos minutos quedaba transformado en una nube blanca de la cual desaparecía la polarización. La causa de la variación en el tiempo de sus experimentos puso de manifiesto un factor crucial: el tamaño de las partículas. Al principio la nube azul está constituida de partículas “[...] cuyos diámetros son sólo una fracción muy pequeña de la longitud de onda de la luz violeta”. Sus experimentos lo llevaron a la conclusión de que la nube azul “[...] gradualmente se hace más impura cuando empiezan a formarse partículas de un tamaño demasiado grande; en otras palabras, igual que cuando se forman las nubes reales”. La botella de Tyndall, en su opinión, no sólo contenía un cielo azul, sino también tenía nubes que emergían de ese cielo.

En el vacío, un rayo de luz es invisible a menos que incida directamente en el ojo. Pero si este rayo encuentra una partícula muy pequeña, una fracción de su luz es dispersada en todas las direcciones. Si el rayo es lo suficientemente intenso, y si el medio a través del cual pasa contiene una alta concentración de partículas pequeñas, se ve un poco de su luz en la dirección transversal al rayo, que permite ver al rayo sin tener que mirar directamente hacia la fuente emisora. Si las partículas son muy pequeñas, como sucede en la atmósfera, la dispersión depende de la longitud de onda de la luz: cuanto más corta es la longitud de onda, mayor es la intensidad de la dispersión. Esto resume los trabajos de investigación de Tyndall, y el fenómeno que el intentó explicar se llamó (y se sigue llamando) efecto Tyndall.

John Ruskin (1819-1900), en su libro *Pintores modernos*, mucho antes que Tyndall hiciera sus experimentos, incluyó un capítulo titulado “A cielo abierto” que comenzaba señalando que “es extraño lo poco que, en general, sabe la gente del cielo, sin embargo [...] no hay un solo momento, de un solo día de nuestras vidas en que la naturaleza no está produciendo un escenario tras otro, un cuadro tras otro, una gloria tras otra”. En el mismo capítulo Ruskin había hecho hincapié en que el azul del cielo “[...] es, por supuesto, el color del aire atmosférico puro, no del vapor acuoso, sino del nitrógeno y del oxígeno puros y éste es el color de la masa total de ese aire que está entre nosotros y el vacío del espacio”. A partir de este convencimiento, Ruskin dedujo importantes consecuencias para la pintura, que vio plasmadas particularmente en las pinturas de J. M. W. Turner (1775-1851). “[...] si uno mira intensamente el azul puro de un cielo

*sereno, verá que hay una variedad y una abundancia en su quietud misma. No es un color chato, muerto, sino un cuerpo profundo, palpitante, transparente de aire penetrable. [...] A esa transparencia trémula ha apuntado especialmente nuestro gran maestro moderno [Turner], quien nos ofrece [...] algo que no tiene ninguna superficie, a través de la cual podemos sumergirnos cada vez más, sin resistencia ni fin, hasta la profundidad del espacio; mientras que con los antiguos pintores paisajistas, salvo Claude [Lorraine], en verdad uno debía recorrer un largo camino para llegar al cielo.*



**Figura 4.4.** Fragmento del cuadro “*El Temerario remolcado a dique seco*” pintado por Turner en 1839, que muestra un cielo “ [...] a través del cual podemos sumergirnos cada vez más, sin resistencia ni fin, hasta la profundidad del espacio.”

*Eso sí, al llegar se golpeaba duramente contra él.”* En la Fig.4.4 se muestra un fragmento de la pintura de Turner, “*El temerario remolcado a dique seco*” del año 1839.

Como vemos, la percepción artística de Ruskin llegó a una comprensión de los colores del cielo que los experimentos de Tyndall confirmaron. A su vez, Ruskin alabó la habilidad artística del científico, “[...] formar, en el interior de un tubo experimental, un fragmento de un cielo, ¡más perfecto que el cielo mismo!, esto es magia de la clase más refinada” la ciencia converge con el arte en la “*verdadera maravilla de esta obra de arte*”. En respuesta, Tyndall escribió elogiosamente sobre la idea de Ruskin de identificar a la diosa de la sabiduría con el aire y la calificó de audaz y verdadera: “[...] al oxígeno atmosférico no se le puede dar un valor más elevado que ése” (se refería a la idea de Ruskin de atribuir al oxígeno y al nitrógeno el origen del color azul del cielo).

En su artículo de 1869, Tyndall, sin embargo no se mostraba de acuerdo con esta corazonada de Ruskin. Lo paradójico del caso es que Tyndall era un atomista

convencido, esto es, pensaba que la materia estaba compuesta por átomos y moléculas. Sin embargo creía que el aire puro era “*ópticamente vacío*”, según sus propias palabras. Sus experimentos le llevaron a esta conclusión pues al quitar las partículas microscópicas de polvo, mediante un filtro de algodón, el aire puro carecía de la capacidad de dispersar la luz por sí mismo. Por consiguiente, Tyndall creyó en la existencia de partículas extremadamente pequeñas en la atmósfera que podían ser, o bien pequeñísimas gotas de agua, o bien alguna otra clase de “*materia celeste*” microscópica que hasta podía estar compuesta, incluso, de “*gémenes orgánicos flotantes*”. No tuvo en cuenta, en sus argumentos, la gran diferencia de escala, entre el volumen del tubo de sus experimentos y el volumen de la atmósfera. Como la dispersión de una sola molécula de aire es muy pequeña no la pudo observar en su laboratorio.

Tyndall, más adelante, aceptó que el cielo azul podría deberse a una “*reflexión minúscula proveniente incluso de las moléculas finales*”. Sus experimentos de cielos artificiales hacían que Tyndall se preguntara: “*¿Cuánto deben medir las partículas cuando aparecen por primera vez?*”. Y, aunque estuvo a punto de responder que probablemente al comienzo las partículas no fueran mucho mayores que las moléculas, optó por retroceder. “[...] supongo que debemos de llegar a la conclusión de que aun entonces cada partícula es un montón de moléculas y cada molécula un montón de átomos”.

Tyndall estaba persuadido que en su cielo artificial, las partículas eran lo suficientemente numerosas como para producir un azul contundente. Por otra parte, pensaba que las moléculas “*eran invisibles por sí mismas*” y, por consiguiente, incapaces de “[...] difundir alguna porción perceptible de la luz que choca contra ellas” y que “[...] con el tiempo se podrá descubrir cuántas moléculas así reunidas son necesarias para dispersar una cantidad perceptible de luz al ojo”.

Otro aspecto desconcertante era la cuestión de la polarización. Brewster había hecho notar que el ángulo de polarización completa de la luz reflejada depende del tipo de material: en el caso del agua es de 53° y en un cristal es de 56°. Sin embargo, en el cielo azul real y en los cielos artificiales (diferentes tipos de humo) tienen un ángulo de polarización de 45° independientemente del material que los constituyera. Tyndall dedujo que la “[...] ley de Brewster no se aplica a la materia en esa condición y a la teoría ondulatoria le corresponde explicar por qué”.

La teoría tradicional de la óptica geométrica supone que la luz está constituida por “rayos” que se refractan o se reflejan de acuerdo con la ley de Snell. En la teoría ondulatoria (la óptica física), la luz no está formada por rayos sino por frentes de ondas. Si la onda es armónica la distancia entre las “crestas” de la onda es la longitud de onda. Cuando la luz incide sobre un objeto que es mucho mayor que su longitud de onda los resultados de la teoría ondulatoria prácticamente coinciden con los de la óptica geométrica. Sin embargo, cuando la luz incide sobre un objeto cuya dimensión es comparable o mucho menor que su longitud de onda los resultados de la óptica física y geométrica son muy diferentes. En la época de Tyndall se usaba indistintamente las palabras dispersión y reflexión, como si fueran términos intercambiables, para describir el proceso de interacción de la luz con la materia. Pero cuando las partículas son comparables o mucho menores que la longitud de onda se debe encontrar una nueva manera de describir la interacción entre la luz y la partícula.

Tyndall emplea una metáfora para tratar de distinguir estos dos tipos de “reflexión”: “[...] en realidad, la nube no toma en cuenta el tamaño de las ondas (la longitud de onda) de la luz del sol sino que las refleja todas por igual. Ahora bien, ello puede deberse a que las partículas de la nube son tan grandes en comparación con la longitud de onda de la luz del sol que las dispersa indiferentemente. Un amplio acantilado refleja una gran ola del Atlántico tan fácilmente como una onda producida por el aleteo de un ave marina y, en presencia de superficies reflectantes amplias, la diferencia de magnitud entre las diferentes longitudes de onda puede desaparecer”.

Es decir, Tyndall sostiene que la nube es blanca porque dispersa por igual todas las longitudes de onda. Para el otro límite argumenta. “[...] pero, suponiendo que las partículas reflectantes, en lugar de ser muy grandes, son pequeñas en comparación con la longitud de onda, entonces, la luz incidente, en lugar de ser obligada a retroceder en su totalidad, es reflejada solamente en una pequeña porción. Imaginemos, pues, que tales diminutas partículas extrañas están difundidas en nuestra atmósfera. Ondas de todas las longitudes de ondas van a dar contra ellas y en cada colisión se quiebra una porción de la onda que topa. Por lo tanto, todas las longitudes de onda del espectro, desde el extremo rojo al extremo violeta, se ven afectadas; pero ¿en qué proporciones serán dispersadas? La amplitud (de la dispersión) es una cuestión de relación y cuanto más pequeña es la longitud de onda, tanto mayor es el tamaño relativo de cualquier partícula sobre la cual choca ésta y tanto mayor también la reflexión relativa”.

Por primera vez se daba un argumento físico para explicar por qué la luz de longitud de onda más corta (azul-violeta) se dispersa más que la luz de longitud de onda más larga (roja). Las partículas pequeñas son un obstáculo de mayor tamaño para las longitudes de onda más cortas que para las más largas. Tyndall continúa con sus explicaciones: “[...] *ahora bien, para que la luz solar se conserve blanca, sus proporciones constitutivas no deben alterarse, pero en la dispersión de la luz producida por esas partículas muy pequeñas, vemos que las proporciones se alteran. Hay un exceso de longitudes de ondas más pequeñas y, como consecuencia de ello, en la luz dispersada el azul será el color predominante. Los otros colores deben, en cierta medida, asociarse con el azul: no están ausentes, pero están reducidos. En realidad deberíamos tenerlos todos, pero en proporciones cada vez menores, desde el violeta hasta el rojo*”.

Pero, entonces ¿por qué el cielo no es violeta? Uno de los hombres de ciencia con quién se carteaba le planteó esta pregunta. Tyndall no pudo resolver este enigma del violeta.

La confianza depositada por Tyndall en la analogía y la intuición física nos recuerda la obra de M. Faraday (1791-1867), el genio experimental que le había precedido en el cargo que ocupó en la Real Institución de Gran Bretaña. Ambos eran experimentadores inspirados, sin inclinaciones matemáticas y con un don especial para visualizar lo esencial.

Una explicación más matemática del fenómeno de dispersión, por parte de pequeñas partículas, fue dada por J. W. Strutt (1842-1919), el tercer barón de Rayleigh. Éste se encontró por primera vez con la obra de Tyndall en 1871. En general, coincidía con el enfoque de Tyndall, pero se propuso obtener resultados cuantitativos a través de modelos teóricos.

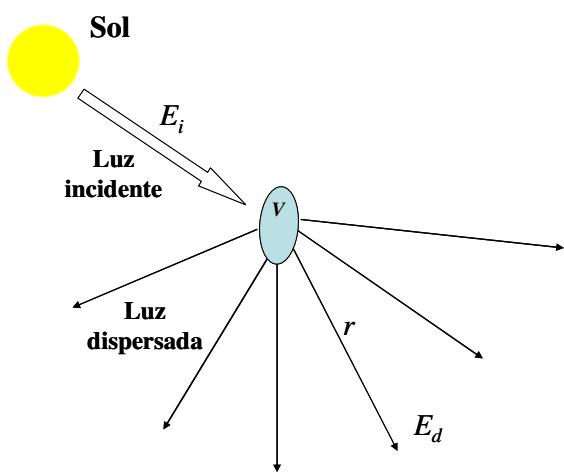
Comenzó por explicar por qué la ley de Brewster parecía fallar cuando se la aplicaba a partículas muy pequeñas. Rayleigh considera que la ley de Brewster se refiere a la reflexión sobre una superficie cuya curvatura es mucho más grande que la longitud de onda. Para partículas pequeñas, que tienen una superficie con una curvatura menor que la longitud de onda, no se pueden aplicar los resultados de la reflexión especular.

Esta re-irradiación por la partícula, de la onda que incide sobre la misma, es lo que comenzó a llamarse “scattering” en inglés. No existe una traducción aceptada de esta palabra. Los españoles han tratado, sin éxito, utilizar la palabra *esparcimiento* para describir el fenómeno. La más utilizada, sin embargo, es la de *dispersión*. Esto nos

origina un problema, porque la palabra dispersión también se usa para designar el fenómeno que se produce cuando la luz se propaga en un medio cuyo índice de refracción depende de la longitud de onda, como en un cristal. Por eso hablamos de la dispersión de la luz por un prisma. El contexto finalmente es lo que decide de qué dispersión se está hablando. Cuando la partícula que interactúa con la luz es pequeña comparada con la longitud de onda, el fenómeno que se produce, no es reflexión ni refracción, es dispersión (o scattering).

Aristóteles parece que vislumbró el fenómeno de dispersión cuando afirmaba “[...] *en algunos espejos son las figuras las que se reflejan, y en otros solamente los colores. A esta última especie pertenecen los espejos que son tan pequeños que son indivisibles a la sensación, en ellos, en efecto, es imposible que la figura sea reflejada pero como algo debe reflejarse y no puede ser la figura, resta que lo sea solo el color*”.

En 1870, Lord Rayleigh, entonces de sólo 28 años de edad, publicó un libro titulado “*On the Light from the sky, its polarization and colour*”. En este trabajo muestra, utilizando un simple análisis adimensional, que las partículas con un diámetro mucho más pequeño que la longitud de onda de la luz que la ilumina, dispersa la luz de acuerdo a la inversa de la cuarta potencia de la longitud de onda. La sugerencia de utilizar un argumento basado en el análisis adimensional para analizar este tema fue de J. C. Maxwell.



**Figura 4.5.** Una pequeña “partícula” de volumen  $V$  dispersa en todas las direcciones a un haz de luz que le llega del Sol.

Los argumentos de Rayleigh son muy simples y los vamos a repetir aquí, aunque en una forma más moderna. Si una partícula es muy pequeña comparada con la longitud de onda de la luz que la ilumina, entonces la dispersión que produce es proporcional a su volumen  $V$ . Esto es, bajo el estímulo de un campo externo todos los osciladores elementales en los que la partícula podría ser subdividida dispersan las ondas, en todas las direcciones, como se muestra

en la Fig.4.5. Rayleigh supone que el campo eléctrico dispersado  $E_d$ , en una cierta dirección, es proporcional al volumen  $V$  de la partícula.

El campo dispersado por la partícula,  $E_d$  se debe a las oscilaciones que induce en la partícula un campo incidente, proveniente del sol, que tiene una amplitud  $E_i$ . Entonces,  $E_d$  debe ser también proporcional a  $E_i$ .

El campo dispersado, en un cierto punto  $P$  del espacio, disminuye con la distancia  $r$  entre este punto y la partícula. Esta disminución es necesaria para que la energía se conserve. Si imaginamos una esfera de radio  $r$ , de superficie  $4\pi R^2$ , centrada en la partícula, entonces la energía total dispersada a través de toda esa superficie esférica debe ser independiente de  $r$ . Esto ocurrirá solamente si el flujo de energía ( $W/m^2$ ;  $W$  (watt) y  $m$  (metro) que proviene de la partícula decrece como  $1/r^2$  (puesto que la superficie crece como  $r^2$ ). Pero el flujo de energía es proporcional a  $E_d^2$ , esto implica que  $E_d$  debe ser proporcional a  $1/r$ . La homogeneidad dimensional requiere entonces que el campo dispersado sea inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda  $\lambda$ , la única cantidad relevante que resta con las dimensiones de longitud (remarquemos que  $V$  es el volumen de la partícula). Entonces:

$$E_d = KE_i V / \lambda^2 r \quad (4.1)$$

Donde  $K$  es una constante sin dimensiones. El flujo de energía dispersada  $I_d$  se calcula elevando al cuadrado la ecuación anterior:

$$I_d = \alpha E_d^2 = K^2 I_i V^2 / \lambda^4 r^2 \quad (4.2)$$

Donde  $I_i = \alpha E_i^2$  es el flujo de energía que incide sobre la partícula.

Se sigue de la ecuación (4.2) que si una partícula es iluminada por luz blanca las componentes de menor longitud de onda (por ejemplo el azul) son más dispersadas que las componentes de mayor longitud de onda.

El resultado crucial de la ley de dispersión encontrada por Rayleigh es que la intensidad de la luz dispersada por las partículas pequeñas es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda. La relación, entre la longitud de onda de la luz roja, de  $650\text{ nm}$  ( $1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$ ), y la luz violeta de  $400\text{ nm}$  es de  $650/400 = 1,63$ . Entonces, de acuerdo con la ley de la cuarta potencia, esperamos que la intensidad de la luz violeta dispersada sea siete veces la de la roja (puesto que  $1,63^4 = 6,97$ ). Pueden encontrarse de esta forma proporciones similares para todas las otras longitudes de onda. Esto

finalmente provee una explicación cuantitativa al argumento cualitativo de Tyndall, aun cuando este resultado nos trae el problema de explicar por qué no vemos al cielo violeta.

Estas predicciones invitan a hacer pruebas cuantitativas. Rayleigh fue el primero que intentó decidir esta cuestión comparando la luz solar directa incidente con la luz dispersada del cielo. En un día soleado, en el interior de una habitación oscura, dejaba pasar por una ranura un fino haz de luz solar que lo hacía incidir sobre un prisma que lo descomponía en sus longitudes de ondas constitutivas sobre una pantalla. (Observemos que hasta aquí es idéntico al experimento de Newton que describimos en el capítulo anterior). La pantalla tenía una ranura que dejaba pasar la luz de una determinada longitud de onda y bloqueaba las otras. Esta luz iluminaba una hoja de papel y era observada atentamente para obtener una medida de la intensidad de la luz solar de ese color. Utilizaba su sensación visual para hacer las mediciones.

De la misma manera, también a la luz “azul” dispersada por la atmósfera la hizo pasar por una pequeña ranura y luego, a través de prismas y aberturas, para medir la intensidad de las diferentes longitudes de onda. Como Rayleigh usaba sus ojos para juzgar y comparar, sus mediciones tendrían que haber sido corregidas de acuerdo con la sensibilidad de la visión a la luz de diferentes longitudes de ondas. Aun así, sus resultados fueron razonablemente fiables y pudo mostrar que confirmaban su ley de dispersión.

Ahora ¿por qué el cielo no es violeta? y además el otro enigma que persistía es ¿qué son estas partículas dispersoras? Rayleigh hace notar la imposibilidad de que las partículas fueran de agua, pues, en un día sin nubes de verano “[...] resulta difícil imaginar partículas de agua más pequeñas que la longitud de onda (de la luz) dotadas de alguna estabilidad”. En efecto, estas pequeñas gotitas tenderían, o bien a evaporarse, o a agruparse con otras para formar gotas más grandes.

Rayleigh contemplaba la posibilidad de que a mayor altura las partículas eran diferentes de las que existen cerca de la superficie de la Tierra. “[...] si las partículas son todas del mismo tipo, creo que hay buenos motivos para proponer que estén constituidas por sal común. Sea como fuere, los fenómenos ópticos no pueden darnos ninguna pista” Rayleigh propone la sal porque es un elemento sumamente común, pero en realidad sabía que sólo era una especulación que se basaba en que la sal podría tener una presencia permanente en la atmósfera debido a la evaporación de los mares. Aunque su

nueva ley de dispersión era satisfactoria, el misterio de las partículas continuaba siendo tan profundo como antes.

En el año 1881 Rayleigh volvía a analizar la interacción de un haz de luz y las partículas pero ahora utilizando la teoría electromagnética de Maxwell. El mismo J. C. Maxwell (1831-1879) le había llamado la atención sobre estas cuestiones en una carta que le dirigió en 1873 en la cual le sugería que calculara la dispersión provocada por partículas, lo suficientemente pequeñas, como para ser moléculas utilizando la teoría electromagnética. Maxwell agregaba que “[...] *el objetivo del estudio es, por supuesto, obtener datos sobre el tamaño de las moléculas del aire*”.

A Rayleigh le llevó muchos años responder el desafío que le había planteado Maxwell en 1873. Su respuesta completa no apareció hasta 1899. En ella confirmaba la intuición de Maxwell y presentaba solamente pequeñas modificaciones a sus cálculos originales de 1871 donde suponía la existencia de pequeñas partículas dispersoras, pequeñas comparadas con la longitud de onda, pero no necesariamente del tamaño de una molécula.

Vamos a describir cualitativamente cómo se produce la dispersión de la luz por parte de una molécula mediante un argumento un poco más actualizado que el utilizado por Rayleigh. Un modelo simple, pero que explica adecuadamente la interacción de un átomo o molécula con la radiación, es suponer que el átomo o la molécula tiene un núcleo con carga eléctrica positiva, rodeada por una nube de carga negativa. La dimensión de este conjunto es del orden de algunas décimas de un nanómetro ( $nm$ ) y, por lo tanto, del orden de mil veces más pequeño que la longitud de onda de la luz visible.

Como los electrones tienen una masa mucho más pequeña que el núcleo, el movimiento del núcleo puede ser ignorado, y el modelo para la molécula se reduce a una masa pequeña cargada negativamente (los electrones) ligados por una fuerza elástica (de origen eléctrico) a un núcleo de masa muy grande. La molécula se comporta entonces como un pequeño oscilador.

La luz que incide sobre la molécula es una onda electromagnética, con su campo eléctrico perpendicular a la dirección de propagación del rayo. Si el campo eléctrico oscila con una cierta frecuencia, se ejerce una fuerza periódica sobre la molécula que provoca oscilaciones forzadas. La molécula se convierte en un dipolo oscilante, que

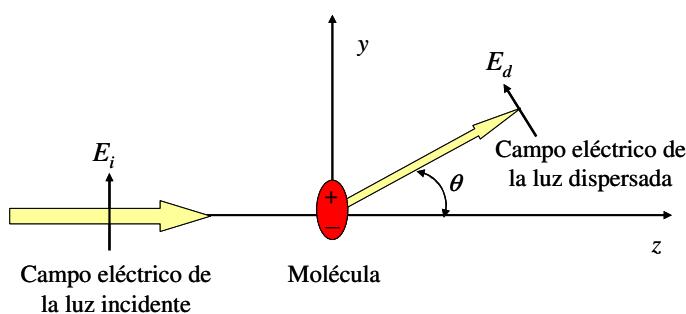
oscila con la misma frecuencia que la onda incidente, por lo tanto, actúa como una pequeña antena que emite radiación electromagnética en todas las direcciones del espacio.

Este es, esencialmente, el mecanismo físico que produce la dispersión o “scattering” en el marco de la teoría ondulatoria. Obsérvese la diferencia con la reflexión de la luz por una superficie “lisa”. En este último caso tenemos un rayo incidente y un solo rayo reflejado.

El cálculo de la radiación emitida por un dipolo oscilante se puede encontrar en un libro de texto sobre electromagnetismo. El resultado es que el campo eléctrico de la radiación es inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda. El campo eléctrico dispersado, también depende del ángulo  $\theta$ , definido por la dirección del rayo incidente y la dirección del rayo dispersado, que se muestra en la Fig.4.6. En la figura también se muestra la dirección del campo eléctrico dispersado. El módulo del campo eléctrico dispersado, que calculó Rayleigh, expresado en unidades modernas, viene dado por:

$$E_d = \alpha_p E_i \frac{4\pi^2}{r\lambda^2} \cos\theta \quad (4.3)$$

donde  $\alpha_p$  es la *polarizabilidad* de la molécula. Su dimensión es  $m^3$  y su valor es aproximadamente igual al volumen de la molécula. Mientras más grande es  $\alpha_p$  mayor es la magnitud del dipolo eléctrico inducido por el campo eléctrico incidente  $E_i$ .



**Figura 4.6.** Dispersión de la luz polarizada, a lo largo del eje y, por una molécula.

El campo eléctrico dispersado, en la dirección paralela al dipolo, el eje y, para el cual  $\theta = \pi/2$  y  $\theta = -\pi/2$ , es nulo. En la dirección paralela al eje z,  $\theta = 0$  y  $\theta = -\pi$  y, en todo el plano x, y, el plano normal al eje z, el campo eléctrico tiene su máximo valor.

La intensidad de la luz dispersada es proporcional al cuadrado del campo eléctrico dispersado. Elevando al cuadrado al campo dispersado  $E_d$ , obtenemos para la intensidad de la luz dispersada la siguiente expresión:

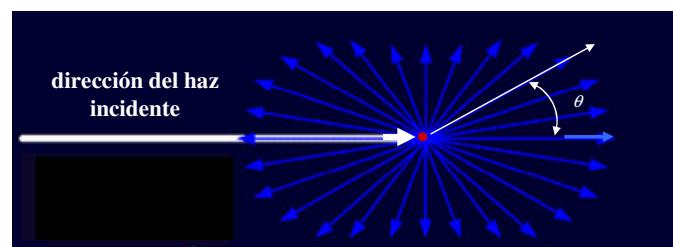
$$I_d = \alpha_p^2 I_i \frac{16\pi^4}{r^2 \lambda^4} \cos^2 \theta \quad (4.4)$$

Este resultado es válido sólo cuando la onda incidente tiene su campo eléctrico paralelo al eje  $y$ . La luz del sol, no tiene una dirección de polarización definida. Esto significa que su polarización puede ser paralela al eje  $y$ . o al eje  $x$ , con la misma probabilidad.

Si el campo eléctrico incidente está polarizado a lo largo del eje  $x$ , la molécula oscila en una dirección paralela al eje  $x$ . En este caso, el campo eléctrico dispersado, en la dirección paralela al dipolo, el eje  $x$ , es nulo y en todo el plano  $x, z$  el campo eléctrico tiene su máximo valor.

Como la luz incidente del sol no está polarizada, podemos suponer que la intensidad total de la luz que incide sobre la molécula se divide, en partes iguales, en luz polarizada a lo largo del eje  $x$  y del eje  $y$ . La intensidad total de la luz dispersada por la molécula es, entonces:

$$I_d = \alpha_p^2 I_i \frac{8\pi^4}{r^2 \lambda^4} (1 + \cos^2 \theta) \quad (4.5)$$



**Figura 4.7.** Si el diámetro  $d$  de la partícula, es menor que  $\lambda/10$  la dispersión se describe mediante la teoría de Rayleigh. Cuando menor es la longitud de onda, esto es para el violeta y el azul, mayor es la dispersión. La dispersión en la dirección frontal y para atrás, es el doble que la dispersión lateral. El diagrama de dispersión en el espacio, se obtiene rotando esta figura alrededor de un eje definido por la dirección del haz incidente

En la Fig.4.7 se muestran algunas de las características de la dispersión que se expresa matemáticamente con la ecuación (4.5): la intensidad dispersada hacia delante (en la dirección de la radiación incidente) es la misma que la intensidad dispersada hacia atrás, mientras que la intensidad de la radiación lateral es la mitad que la frontal. En la

dispersión Rayleigh, se dispersa mucho más el azul que los otros colores, debido a la dependencia inversa con la longitud de onda a la cuarta. Para tener una mejor idea del diagrama de dispersión de la partícula en el espacio tenemos que girar el diagrama de la Fig.4.7 alrededor de la línea definida por el rayo incidente.

La ecuación (4.5) puede ser utilizada también para encontrar la intensidad dispersada por un *aerosol* siempre que su tamaño, por ejemplo, su diámetro, sea menor que  $\lambda/10$ . El término *aerosol* se utiliza para designar una suspensión de sólidos finos o pequeñas gotas en un gas.

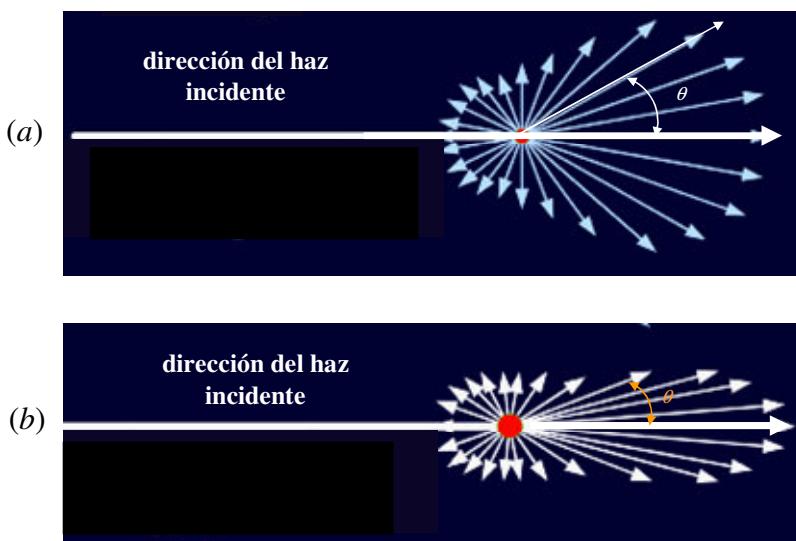
La longitud de onda de un color verde-azulado es de aproximadamente  $500\text{ nm}$  ( $1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$ ). Esto significa que si el diámetro del aerosol es menor que  $50\text{ nm}$  dispersará, a luz de esta longitud de onda, de acuerdo a la ecuación (4.5). El tamaño de una molécula de oxígeno, de nitrógeno o de agua es del orden de  $0.3\text{ nm}$ .

El coeficiente de polarizabilidad  $\alpha_p$  de una partícula es proporcional a su volumen, de modo que la intensidad dispersada es proporcional al diámetro  $d$  de la partícula a la sexta potencia ( $d^6$ ). Esto significa que la intensidad de la luz dispersada por una gotita de agua de  $30\text{ nm}$  es  $10^{12}$ , (un billón de veces!!), más grande que la luz dispersada por una molécula de agua o que una molécula de oxígeno o nitrógeno.

Tyndall, en sus experimentos, cuando sacaba las “impurezas” de la botella y quedaba el aire puro, no observaba ninguna luz dispersada. Las impurezas que había introducido en la botella, tenían un diámetro mucho menor que la longitud de onda, pero mucho mayor que las moléculas del aire. La intensidad de la luz azul que dispersaban era del orden de  $10^{12}$  veces mayor que la que dispersaba una sola molécula de aire. En otras palabras, la suma de las intensidades dispersadas por todas las moléculas de aire de la botella, era mucho menor que la suma de las intensidades dispersadas por las partículas suspendidas en el aire. Por ese motivo, al quitar estas partículas de la botella no observaba luz dispersada. Eso le llevó a suponer que el aire puro carecía de la capacidad de dispersar la luz. Sabemos ahora que sí dispersa, pero tan débilmente que no lo pudo observar. El físico G.G. Stokes (1819-1903), en el año 1886, le señalaba a Tyndall que la observación de la luz dispersada por el aire “[...] *difícilmente esté al alcance de la experimentación, considerando cuan pequeños son los espesores de aire a través de los cuales miramos en nuestros experimentos en comparación con los kilómetros a través de los cuales lo miramos al observar el cielo*”.

Si la partícula tiene un diámetro  $d$ , superior a  $\lambda/10$ , la teoría de Rayleigh deja de ser válida. Un científico alemán, Gustav Mie (1869-1957) desarrolló en 1908 una teoría de la dispersión (conocida como *dispersión Mie*) para cualquier relación entre  $d$  y  $\lambda$ , es decir, que no tiene limitaciones para el tamaño de la partícula. Sin embargo, si el tamaño de la partícula es menor que  $\lambda/10$  la dispersión calculada por Mie coincide con la dispersión Rayleigh.

Si el diámetro de la partícula dispersora está en el rango  $\lambda/10 \leq d < \lambda$  la intensidad de la dispersión Mie hacia delante es más grande que la que va para atrás como se muestra en la Fig.4.8a, y dispersa la luz azul un poco más que los otros colores.



**Figura 4.8.** Si el diámetro  $d$  de la partícula, es mayor que  $\lambda/10$  la dispersión se describe mediante la teoría de Mie. (a) Si  $\lambda/10 \leq d \leq \lambda$ , la radiación en la dirección frontal es mayor que en las direcciones para atrás y lateral y la luz azul es dispersada un poco más que los otros colores. (b) Si  $d > \lambda$ , la radiación en la dirección frontal se hace más grande cuando mayor es el diámetro de la partícula y ésta se confina en un cono de ángulo cada vez más pequeño. La dispersión es prácticamente la misma para todos los colores, de modo que si la luz incidente es blanca la luz dispersada es también blanca.

Si  $d \gg \lambda$ , la luz dispersada hacia delante, como se muestra en la Fig.4.8b, es mucho mayor que la dispersada hacia atrás y todos los colores son dispersados por igual. Si la radiación incidente es blanca la luz dispersada también será blanca. La luz dispersada hacia delante se encuentra en un cono con un ángulo de apertura que es más pequeño cuando más grande es la partícula.

Tyndall ya había encontrado, en sus experimentos, que el tamaño de las partículas tenía un papel muy importante en el color que se observaba en el interior de la botella. Si las

partículas, conjeturaba, tenían un diámetro que eran sólo una fracción de la longitud de onda, la luz dispersada era azul, pero que a medida que aumentaba el diámetro de las partículas el azul se hacía más débil hasta que finalmente adquiría un color blanco, igual que las nubes. Tyndall dedujo que, cuando el diámetro de las partículas era mucho mayor que la longitud, ésta “reflejaba” igualmente bien todas las longitudes de onda del espectro visible. Entonces si la botella se iluminaba con luz blanca se veía blanca. La botella de Tyndall, en su opinión, no sólo contenía un cielo azul, sino también tenía nubes que emergían de ese cielo. Como veremos más adelante, la dispersión Mie, además de explicar el color blanco de las nubes, esclarece otras particularidades del color del cielo.

## 5

### Los átomos, las fluctuaciones y el cielo azul

En el corazón de la física moderna está la *hipótesis atómica*: la simple noción de que el universo es fundamentalmente granular.

*“Si algún cataclismo destruyera todo el conocimiento científico, y sólo se pudiera transmitir una frase a la siguientes generaciones, ¿cuál sería la idea que tenga la mayor información en el menor número de palabras? Yo creo que es la hipótesis atómica (o el hecho atómico, o lo que quieras llamarlo), que todas las cosas están hechas de átomos - pequeñas partículas que se mueven en movimiento perpetuo, que atraen a las demás cuando están un poco separados pero que se repelen cuando están muy cerca entre sí. En esa frase, encontrarán una enorme cantidad de información sobre el mundo, cuando la utilicen aunque sea con sólo un poco de imaginación.”*

(Feynman, R P, 1964, *Las clases de Feynman sobre física*).

Todas las cosas están hechas de átomos que son pequeñas partículas con las que no podemos experimentar directamente. Aunque no podemos ver, oír, oler o sentir a los átomos individuales, existe abundante evidencia científica de que existen. Después de casi doscientos años de pruebas experimentales, la hipótesis atómica no ha sido refutada. La mayoría de los científicos piensan a la *hipótesis atómica* como un *hecho*. Aun así, la idea sigue siendo contraria al sentido común. La materia no revela fácilmente su granularidad fundamental. Lo que realmente vemos y sentimos en nuestra vida diaria es un mundo continuo.

La palabra *átomo* fue adoptada en Grecia, alrededor de 450 a.C., por un filósofo llamado Demócrito, quien suponía que todo cuerpo material, aun cuando parezca un continuo, se compone de pequeños corpúsculos de materia. Al más pequeño de estos corpúsculos lo llamó *átomo*, que en griego significa, indivisible. Un *átomo*, en esta

teoría, era la cosa más pequeña que existe. Es difícil decir cuan “científica” fue la teoría atómica de Demócrito, ¿fue una teoría real, desarrollada usando algo similar al método científico actual que está basado en la observación de los hechos y la lógica deductiva? ¿O fue sólo un golpe de suerte? Esto es discutible aunque hay que darle crédito a una de sus reflexiones, innegablemente ingeniosa: “*Nada existe excepto los átomos y el espacio vacío, todo lo demás es opinión*”. Con esta especulación de Demócrito, L. M. Lederman, premio Nobel de Física de 1982, inicia su libro de divulgación científica: *La partícula de Dios: si el universo es la respuesta, ¿cuál es la pregunta?* (1993).

La idea de Demócrito fue eclipsada por la teoría de Aristóteles, que veía a todo el universo conocido como compuesto de cinco "elementos" distintos: tierra, fuego, aire, agua y éter que se mezclan y combinan para formar cualquier otra sustancia. En la teoría de Aristóteles no era necesario pensar que la materia está formada por átomos pequeños.

Debido a la notable lógica de los razonamientos de Aristóteles, sumado al hecho de que era considerado el primer erudito de su época, muchos de sus puntos de vista fueron casi indiscutibles. El punto de vista atómico de Demócrito perdió fuerza, mientras que aumentaba la aceptación de la concepción de Aristóteles, hasta el punto que era casi una herejía cuestionarlo.

Entre 1803 y 1807 John Dalton (1766-1844) revivió la teoría atómica. En su libro *A New System of Chemical Philosophy* (1808) señala que la materia, “[...] *aunque divisible en grado extremo, sin embargo no es infinitamente divisible*”. Suponía que “[...] *debe haber un cierto punto, más allá del cual, no podemos continuar la división de la materia [...] he escogido la palabra “átomo” para designar esta últimas partículas [...]. Si algunos átomos de agua fueran más pesados que otros, si una porción de líquido en cualquier ocasión estuviera constituida principalmente de estas partículas más pesadas, se observarían variaciones en la densidad de diferentes muestras de agua, una circunstancia no reparada hasta el momento. Observaciones semejantes pueden hacerse si se consideran otras sustancias. Por tanto, podemos concluir que las partículas últimas (átomos) de todos los cuerpos homogéneos deben ser perfectamente iguales entre sí*”.

La hipótesis atómica de Dalton está basada en la ley de las proporciones definidas observadas en las reacciones químicas y representa un intento para explicar la regularidad que se notaba en esas reacciones.

En 1808, Gay-Lussac (1778-1850) había descubierto, de manera independiente de Dalton, que cuando gases diferentes se combinan químicamente, sus volúmenes mantienen una proporción de números enteros simples. En 1811, Amedeo Avogadro (1776-1856) interpretó que esto se debía a que volúmenes iguales de cualquier gas

ELEMENTS		
Hydrogen	W	Strontian
Azote	5	Barytes
Carbon	5	Iron
Oxygen	7	Zinc
Phosphorus	9	Copper
Sulphur	13	Lead
Magnesia	20	Silver
Lime	24	Gold
Soda	28	Platina
Potash	42	Mercury

**Figura 5.1.** Los elementos y los símbolos que se utilizaron para representarlos en la época de Dalton. Los números son sus pesos relativos. El azote era el nombre para el nitrógeno. Los pesos relativos tienen errores, en parte porque no se distinguía al hidrógeno atómico del molecular. Las tablas de los elementos y sus pesos atómicos mejoraron debido a que los químicos aprendieron a medir mejor las masas relativas de los elementos.

debían contener una cantidad igual de partículas en condiciones estándar de temperatura y presión. La validez de esta hipótesis implicaba que las “partículas últimas” de Dalton, que constituían los diferentes elementos, no consistirían exclusivamente de átomos individuales, sino también de moléculas, como la molécula de  $O_2$  que está compuesta de dos átomos de oxígeno.

Según Avogadro, si A y B son dos gases que están a la misma temperatura y presión, sus volúmenes son iguales y el número de moléculas,  $N$ , en ambos es la misma. Si  $m_A$  y  $m_B$  son las masas de las moléculas A y B, entonces las masas totales  $M_A$  y  $M_B$  de los dos gases, están en la relación  $M_A/M_B = m_A/m_B$ .

Se ha encontrado que es cómodo expresar la masa  $m$  de un átomo o de una molécula en unidades de una masa estándar  $m_0$ . Esta masa “unitaria”  $m_0$  puede tomarse con respecto a la masa de cualquier átomo. Al principio se lo refería al átomo de hidrógeno y, más recientemente respecto de la masa  $m_C$  de un átomo del isótopo de carbono  $^{12}C$ , de modo que por definición  $m_0 = m_C/12$ . La masa de un átomo  $^{12}C$  es entonces

exactamente igual a 12 unidades de masa. La masa de un átomo de hidrógeno  $H$  es aproximadamente igual a 1.

La relación entre la masa  $m$  de un átomo (o de una molécula) y la masa unidad  $m_0$  se denomina masa atómica del átomo (o masa molecular de la molécula) y se la designa por  $\mu$ , donde  $\mu \equiv m/m_0$ .

A comienzos del siglo XIX era imposible hacer la medición de la masa de un átomo o molécula, sin embargo, se pudieron medir las masas relativas de diferentes elementos.

Si se define el *mol* de una sustancia como *la masa atómica o molecular de esa sustancia expresada en gramos*, entonces, el número de átomos o moléculas, contenida en un mol es la misma para todas las sustancias. El mol del hidrógeno molecular  $H_2$  es de aproximadamente dos gramos, 2g, el del oxígeno molecular  $O_2$ , 32g y el del agua  $H_2O$  18g. Si sepáramos 2g de hidrógeno molecular, 32g de oxígeno molecular y 18g de agua y las introducimos en tres cajas, cada caja contiene el mismo número total de moléculas.

El número de Avogadro,  $N_A$ , es el número de moléculas que hay en un mol. Avogadro no pudo determinar el número de moléculas existente en un mol porque no disponía de los medios de contar las moléculas individuales en forma directa o indirecta. Suponía acertadamente que este número sería extremadamente grande.

El número de Avogadro debería revelar la diferencia de tamaño entre el mundo microscópico de los elementos atómicos y el mundo macroscópico de los seres humanos.

La conexión entre el mundo microscópico y el mundo macroscópico ha fascinado a la humanidad durante siglos, sin embargo, los físicos y químicos del siglo XIX utilizaban a los átomos y moléculas sólo como meras nociones hipotéticas que podían proporcionar una imagen muy conveniente de la materia, pero muchos, si no la mayoría de ellos no estaban convencidos de la existencia real de los átomos y moléculas.

Sus principales objeciones eran las siguientes:

- No hay ninguna evidencia observable de estos átomos invisibles.
- Los átomos indivisibles no podían explicar los cambios de energía en las reacciones químicas.

- La idea de la existencia de los átomos y las moléculas supone que la materia es discontinua y contradice la creencia de los científicos en las teorías de gran éxito como la termodinámica y las teorías de ondas, que aceptan que la materia es continua.
- El exceso de imaginación, sin una corroboración experimental exitosa, producirá una mala fama a la ciencia y a los científicos que utilizan el dinero público para solventar sus trabajos.

A pesar de sus detractores y de los escépticos, la hipótesis atómica contaba con varios partidarios en los finales del siglo XIX. Si los átomos existen, entonces la materia es discontinua y tiene que ser posible contar los átomos presentes en una cierta cantidad de materia. Por ese motivo, la determinación del número de Avogadro mediante métodos irrefutables fue un punto clave en la defensa de la concepción atómica. Además, la determinación de este número podría permitir la determinación de otras propiedades de los átomos, por ejemplo, el tamaño y la masa de las moléculas.

Para determinar el número de Avogadro se tienen que encontrar cantidades macroscópicas que dependan de cantidades microscópicas. La teoría apropiada para encontrar una relación entre magnitudes de estas dos escalas fue la teoría cinética de los gases concebida por J. C. Maxwell.

Entre 1850 y 1875, Maxwell desarrolló las bases de la moderna teoría cinética de la materia. Supuso que las sustancias estaban compuestas de átomos y a partir de esta teoría pudo “explicar” algunas propiedades macroscópicas de los gases que ya se conocían en la Termodinámica.

Maxwell dedujo también, como resultado de estos trabajos, la distribución de las velocidades de los átomos en un gas. Esta cantidad indica cuántos átomos del gas tienen una velocidad en un cierto entorno de la misma.

La teoría cinética de Maxwell asociada con las mediciones experimentales de Gay-Lussac permitió encontrar una simple relación entre la presión, el volumen y la temperatura de un gas diluido al que se denominó *gas ideal*. En esa teoría se introdujeron dos cantidades, una de ellas denominada constante “universal” de los gases, designada por  $R$ , que es una cantidad macroscópica que puede determinarse experimentalmente y la otra es la constante de proporcionalidad entre la energía cinética media de una molécula y la temperatura absoluta del gas,  $k_B$ . Esta constante

“microscópica” es ahora conocida como “*constante de Boltzmann*”. La teoría cinética demostraba además que ambas están relacionadas por la expresión:

$$k_B = \frac{R}{N_A}$$

Donde,  $N_A$ , es el número de Avogadro!!

Maxwell fue un líder en la tarea de convencer a otros de la realidad física de los átomos, por ese motivo estaba muy interesado en la determinación del número de Avogadro. Utilizando la teoría cinética de los gases, Maxwell calculó la viscosidad de un gas diluido. Si un objeto se desplaza en el interior del gas, las interacciones moleculares se manifiestan en la escala macroscópica por una fuerza de rozamiento resultante que es proporcional a la velocidad del objeto. El coeficiente de proporcionalidad, que se denomina *viscosidad* del fluido, depende del número de moléculas por unidad de volumen del gas, de la velocidad media de las moléculas y de la distancia media entre dos colisiones de la molécula, conocida como *camino libre medio*. Maxwell utilizó las mediciones de la viscosidad de un gas diluido, para estimar el número de Avogadro. Encontró que este número era aproximadamente  $4.2 \times 10^{23}$ . Este es un número increíblemente grande!

Utilizando este valor para el número de Avogadro, encontró que el diámetro de una molécula de nitrógeno sería del orden de  $0.6 \text{ nm} = 0.6 \times 10^{-9} \text{ m}$ , que es aproximadamente la milésima parte de la longitud de onda de la luz de color rojo-naranja.

Maxwell sabía que esta estimación del número de Avogadro era algo burda y procuraba refinarla. Por este motivo intentaba evaluarlo recurriendo a otro tipo de mediciones. En particular, Maxwell consideraba que si el azul del cielo dependía de la dispersión de partículas pequeñas y, si no hay ninguna sustancia en suspensión en la atmósfera, entonces, la solución del misterio es que esas partículas debían ser las moléculas del mismo aire. Hoy su conjectura nos parece asombrosa en su simplicidad y profundidad: los átomos son necesarios para que el cielo se vea azul. Para Maxwell la intensidad de la luz dispersada por una cierta porción de la atmósfera tenía que ser proporcional al número de moléculas. Por eso le sugirió a Rayleigh que investigara cómo interacciona la luz con un conglomerado de átomos, utilizando la teoría electromagnética: “[...] si usted puede establecer la cantidad de luz dispersada en una dirección dada por un

*estrato (de atmósfera) de cierta densidad y espesor, podríamos obtener un poco más de información sobre esos diminutos cuerpos”.*

A Rayleigh le llevó muchos años responder el desafío que le había planteado Maxwell en 1873. Su respuesta completa no apareció hasta 1899. Esta vez tuvo que introducir el número de moléculas de aire por unidad de volumen para poder evaluar el número de partículas que dispersan la luz solar porque supuso, que la intensidad de la luz dispersada por un dado volumen de la atmósfera, es proporcional al número de moléculas que se encuentran en ese volumen. Este número está relacionado con el número de Avogadro que es el número de moléculas presente en un mol.

Como la dispersión de la luz es la causa principal de la atenuación de un rayo de luz que se propaga a través de la atmósfera, Rayleigh pudo calcular la atenuación de la intensidad de un rayo luminoso que se propaga en la atmósfera. Pierre Bouguer fue el primero en reconocer que un rayo de luz que pasa a través de la atmósfera va extinguiéndose, esto es, haciéndose más tenue a medida que se propaga. Observó que el brillo de una estrella depende del ángulo en que se encuentre en relación al cenit. Cuando más grande es este ángulo, es mayor la cantidad de atmósfera que atraviesa su luz y, por lo tanto, su brillo disminuye. Bouguer afirmaba también que la atmósfera produce “[...] *una separación real en la luz, pues los rayos rojos penetran mucho más profundamente, en tanto que los rayos azules, al tener menos fuerza para atravesar la atmósfera en línea recta, se reflejan más débilmente*”. Esta observación de Bouguer es ahora explicada por Rayleigh, los rayos azules “*tienen menos fuerza*” porque son los más dispersados y no alcanzan a llegar donde se encuentra el observador si la estrella está cerca del horizonte.

Se llama *alcance visual* a la mínima distancia en la que se produce un contraste insuficiente para distinguir un objeto negro muy lejano (por ejemplo, una montaña), del color del cielo del horizonte. La forma más sencilla de estimar el alcance visual es determinar hasta qué distancia uno puede ver, en un día claro de cielo azul sin nubes. En 1760, Bouguer estimó esa distancia en 180 Km, y en 1899 el mismo Rayleigh afirmó haber visto al Everest “*completamente reluciente*” desde Darjeeling que está a 160 Km de distancia. Volando sobre la costa atlántica en la Provincia de Santa Cruz, en un día claro, se puede observar nítidamente la cordillera de los Andes que se encuentra aproximadamente a 200 Km. En este caso, los rayos luminosos se propagan entre dos puntos que están a gran altura (10 Km en el avión y del orden de 4 Km para las alturas

de las montañas). Estos valores del alcance visual muestran que la dispersión de Rayleigh es un fenómeno muy débil.

Utilizando las medidas del alcance visual y la fórmula para la atenuación del rayo luminoso que se produce por la dispersión, se puede calcular el número de Avogadro. Si se supone que el alcance visual es de aproximadamente 160 Km se obtienen valores para el número de Avogadro situados en el intervalo  $1-8 \times 10^{23}$ , que está dentro del orden de magnitud del valor aceptado actualmente (del orden de  $6 \times 10^{23}$ ). Seguramente el alcance visual sería mayor si en el aire no hay polvo ni otras materias en forma de partículas, ya que estas causan una considerable dispersión, además de las producidas por las propias moléculas del aire.

El número de Avogadro también puede determinarse estudiando el *movimiento browniano*, como se denomina a la agitación incesante e irregular de pequeñas partículas suspendidas en un líquido. En 1827 Robert Brown (1773-1858), un botánico muy conocido, estaba estudiando el comportamiento de las partículas contenidas en los granos de polen cuando éstos eran introducidos en una gota de agua. Comenzó con el polen de una planta (*Clarckia pulchella*) cuyos granos eran alargados (de unos 5 micrones de largo aproximadamente). Observó (con el microscopio) que estos gránulos estaban en constante movimiento, y se aseguró de que este movimiento no fue causado por las corrientes de evaporación en el líquido. Si los granos eran más pequeños sus movimientos eran más vigorosos.



**Figura 5.2.** Los granos del polen de la *clarckia pulchella* introducidos en una gota de agua estaban en constante movimiento.

Al principio pensó que se sacudían porque estaban vivos. Hizo el mismo experimento con plantas muertas y notó que tenían el mismo movimiento. Pensó que tal vez toda la materia orgánica, todo lo que alguna vez vivió, contenía todavía una vida misteriosa a este nivel microscópico. Encontró también el movimiento si utilizaba pequeños fragmentos de madera fosilizada. Pero, luego advirtió que diminutas partículas de materia que nunca tuvo vida, como las partículas de cristal de la ventana, también se movían. El movimiento evidentemente no tenía nada que ver con el hecho de que la

sustancia alguna vez tuvo vida, para gran sorpresa de Brown. Entonces, ¿cuál era la causa? Ninguna de las explicaciones que se le ocurrió le pareció satisfactoria. Llegó finalmente a la conclusión de que con los conocimientos de los que disponía no podía comprender el movimiento de estas pequeñas partículas.

El trabajo de Brown circuló privadamente entre un público reducido pero selecto. La gran mayoría de los científicos, o tenían otros intereses o no tenían la menor idea de por qué las partículas se movían, por lo que este movimiento aleatorio siguió siendo una anomalía inexplicada.

Medio siglo más tarde, surgió otra posible explicación. Esta se basaba en la teoría cinética de Maxwell. Esta teoría, sin embargo, no tenía un consenso unánime entre los científicos de la segunda mitad del siglo XIX. Los seguidores de la teoría cinética suponían que la materia estaba compuesta por átomos o moléculas y la explicación del movimiento browniano era básicamente el siguiente: como todas las moléculas en el líquido estaban continuamente en movimiento, entonces el movimiento de los pequeños gránulos de polen podría ser causada por el constante golpeteo en todas las direcciones producido por las colisiones con las moléculas del fluido.

El botánico alemán K. Nägeli (1817-1891) publicó un trabajo en 1879 en el que trató de probar que este mecanismo no podía ser el causante del movimiento browniano. Para ello, usó las estimaciones de las masas y velocidades de los átomos, que se habían obtenido mediante la teoría cinética, para evaluar los cambios en la velocidad que experimentaría la partícula browniana después de una colisión con un átomo del fluido. Según sus cálculos estos cambios tenían valores extremadamente pequeños, por lo que concluyó que ésta no podía ser la causa del fenómeno.

El científico francés L. Gouy (1854-1926) hizo la importante sugerencia de que el movimiento browniano podría ser una violación de la segunda ley de la termodinámica. El argumento que daba era que, al moverse la partícula en el fluido, en lugar de disipar su energía cinética en calor debido a la fricción (la viscosidad entre el fluido y la partícula) ocurría que en ciertos momentos la velocidad de la partícula ¡aumentaba! Esto significaba que de alguna manera la partícula extraía energía calorífica del fluido y la transformaba en energía cinética.

A fines del siglo XIX y aún a principios del siglo XX, la teoría atómica de la materia se encontró bajo muy fuertes ataques. En particular, la teoría era puesta en duda por los

integrantes de la llamada escuela energética, como G. Helm, E. Mach, W. Ostwald y P. Duhem. Ellos sostenían que había muchas contradicciones entre las conclusiones de las teorías atómicas por un lado y las obtenidas de las leyes de la termodinámica, por el otro. Propusieron rechazar de plano la teoría atómica y cinética de la materia y quedarse solamente con las leyes macroscópicas de la termodinámica.

En resumen, podemos decir que en los primeros años del siglo XX la situación era la siguiente: por una parte, no se tenía una explicación firme y clara de las causas del movimiento browniano; al contrario, lo que se tenía era un panorama muy confuso y contradictorio. Por otro lado, un gran número de importantes científicos no aceptaba la hipótesis de la constitución atómica de la materia. Ellos sostenían que no era necesario desarrollar una teoría microscópica de las propiedades de la materia porque las leyes de la termodinámica eran suficientes, pues contenían toda la información necesaria sobre un sistema físico. Además, así se evitarían todas las inconsistencias y paradojas que aparentemente contenía la teoría atómica.

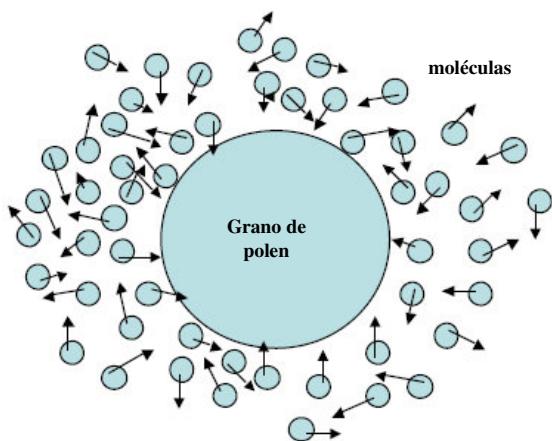
El físico alemán W. Ostwald consideraba a los átomos sólo como “*[...] meras nociones hipotéticas que podían proporcionar una imagen muy conveniente de la materia.*” E. Mach alegaba que todas las entidades teóricas, incluidas átomos y moléculas, debían ser tratadas como ficciones útiles.

Einstein, después de su doctorado en 1903, subrayaba que el propósito original de sus investigaciones en teoría atómica “*[...] era hallar hechos que prueben, en lo posible, la existencia de átomos de masa y tamaño definidos*”. En 1905 publicó un célebre trabajo en el que presentó la explicación del movimiento browniano. Para apreciar la contribución de Einstein hay que mencionar que, hasta ese momento, todos los argumentos sugeridos para explicar el movimiento browniano habían sido sólo *cualitativos*. Es decir, no se había formulado ninguna teoría de la que se pudiera derivar alguna relación que fuera susceptible de medirse experimentalmente. Se interesó, en particular, por las consecuencias que se obtendrían si el movimiento browniano se explicaba por medio de la hipótesis atómica.

Einstein utilizó la teoría cinética de Maxwell, perfeccionada por Boltzmann, para estudiar el movimiento browniano. Supuso que el líquido estaba compuesto por átomos, que estaban constantemente en un movimiento desordenado, que chocaban con la

partícula suspendida y que estos choques serían las causantes del movimiento aleatorio de las partículas.

Un escollo importante fue la objeción de Nägeli, que mencionamos antes, acerca de la imposibilidad de que el movimiento browniano se pudiera explicar como efecto de las colisiones entre la partícula browniana y los átomos que componen el fluido. Einstein demostró que el argumento de Nägeli no era correcto. En efecto, en primer lugar, según había mostrado Maxwell, las partículas del fluido no tenían todas la misma velocidad, sino que tenían muchas velocidades; es decir, tenían una distribución de velocidades. Además, estas velocidades tienen todas las posibles direcciones (Fig.5.3).



**Figura 5.3.** Las colisiones que experimenta una partícula browniana en el interior de un fluido.

En segundo lugar, el número de colisiones que experimenta una partícula de  $1\mu m$  de radio, en un fluido como el agua es extraordinariamente grande, del orden de  $\sim 10^{20}$  (un uno seguido de veinte ceros) colisiones en cada segundo! En promedio, la fuerza debido a estas colisiones es nula. No obstante, debido a las *fluctuaciones*, puede ocurrir que en ese segundo, se tengan  $10^{10}$  moléculas más que colisionan en el lado izquierdo de la partícula. Este número de moléculas, que es muy pequeño comparado con el número total de moléculas que colisionan con la partícula, pueden ejercer una fuerza lo suficientemente grande para mover a la partícula de polen.

Einstein ya había trabajado en la teoría microscópica de la termodinámica, teoría que en la actualidad recibe el nombre de *mecánica estadística*. En el transcurso de estas investigaciones se vio en la necesidad de estudiar las fluctuaciones que ocurren en las cantidades termodinámicas alrededor de sus valores de equilibrio. Una vez que pudo establecer con claridad las características de estas fluctuaciones se interesó en aplicar las

ideas desarrolladas a otros fenómenos físicos que involucraban también fluctuaciones. Éste fue uno de los motivos por los que se interesó en el movimiento browniano. El título del artículo, en una traducción libre, es “*Sobre el movimiento de pequeñas partículas suspendidas en líquidos estacionarios como lo requiere la teoría cinética molecular del calor*”.

En este trabajo obtuvo, además de conclusiones cualitativas, predicciones cuantitativas que podrían compararse con resultados experimentales. En particular mostró que la segunda ley de la termodinámica se cumple sólo en promedio y calculó la distancia que recorre una partícula suspendida en un fluido en función del tiempo.

El modelo más simple imaginable del movimiento browniano es el simple “*caminar del borracho*”. Un borracho no está seguro de sus pasos; estos pueden ir hacia adelante o hacia atrás o en cualquier otra dirección. Además, cada paso que hace es independiente del que ha tomado. Por lo tanto, su movimiento es tan irregular que nada se puede predecir sobre la siguiente etapa. ¿Hasta dónde puede alejarse del punto de partida? y ¿cómo varía esta distancia con el número de pasos?

Einstein adoptó este punto de vista para obtener la probabilidad de que la partícula browniana se desplace una distancia determinada en el tiempo  $t$ .

Para mantener las cosas lo más simple posible, vamos a analizar el *paseo al azar* en una sola dimensión. El borracho, se tambalea hacia adelante y atrás, en una línea: el eje  $x$ . Suponemos que el borracho da los pasos  $x_1, x_2, x_3$ , etc., donde cada paso  $x$  es igual a +1 o -1, con igual probabilidad. La distancia  $X$ , a su punto de partida, después de  $N$  pasos es:

$$X = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_i + \dots + x_N$$

Cada paso  $x_i$  toma los valores +1 ó -1, con la misma probabilidad. En consecuencia, en promedio, después de muchos pasos, la distancia total  $X$  será igual a cero. Esto se llama el valor esperado de  $X$ , y se escribe  $E(X)$ . Por lo tanto:

$$E(X) = 0$$

En cualquier caminata aleatoria,  $X$  puede diferir un poco del valor esperado. ¿en cuánto puede variar  $X$  del valor esperado? La desviación del valor esperado  $r$  puede medirse simplemente como

$$r = X - E(X)$$

El valor esperado de  $r$ , es cero, pero la dispersión de las variaciones de  $X$  alrededor del valor esperado puede ser estimada teniendo en cuenta la magnitud de  $r$ . La forma habitual de hacerlo es mediante el valor esperado del cuadrado (que es siempre positivo) de  $r$ . Puesto que  $E(X) = 0$ ,

$$E(r^2) = E(X^2) = E(x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_i + \dots + x_N)^2$$

Pensemos cuál es el resultado que se obtiene elevando el paréntesis de la ecuación anterior al cuadrado. Hay  $N$  términos del tipo  $x_i^2$ . También hay términos “mixtos” del tipo  $x_i x_j$  con  $i$  y  $j$  diferentes. Hay  $N(N - 1)$  términos de este tipo, porque se puede elegir al primero de las  $x$  de  $N$  maneras diferentes y al segundo de  $N-1$  maneras diferentes. El valor esperado de  $r^2$  es la suma de los valores esperados de estos dos tipos de términos:

$$E(r^2) = E\left(\sum_{i=1}^N x_i^2\right) + E\left(\sum_{i \neq j} x_i x_j\right)$$

En la primera suma, todos los sumandos  $x_i^2$  son iguales a  $+1$ . Como hay  $N$  de estos términos la primera suma es igual a  $N$ . En la segunda suma, los “*productos mezclados*” son del tipo  $1 \times 1 = 1$ ,  $-1 \times -1 = 1$ ,  $1 \times -1 = -1$  y  $-1 \times 1 = -1$ . Sus términos, entonces, tienen la misma probabilidad de ser  $+1$  y  $-1$ . Por lo tanto, el valor esperado de esta suma es simplemente cero. Llegamos entonces al resultado muy simple:

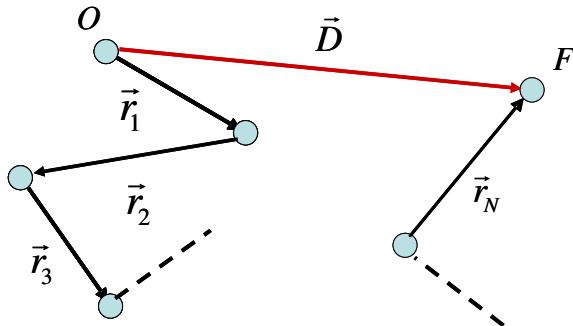
$$E(X^2) = N$$

El valor esperado de la desviación cuadrática  $E(X^2)$  se llama la *variancia*. Su raíz cuadrada es la *desviación estándar*  $\sigma$  que es una buena medida de la dispersión. Esto significa que para el paseo del borracho se tiene

$$\sigma = \sqrt{E(X^2)} = \sqrt{N}$$

Este es un resultado importante. Esto significa que la “distancia” recorrida por el borracho en este proceso aleatorio crece en proporción directa a la raíz cuadrada del número de pasos o, en otras palabras, con la raíz cuadrada del tiempo. A pesar de la simplicidad de este modelo, las partículas brownianas en el interior del líquido se comportan exactamente igual que el borracho. La diferencia es que los desplazamientos

son en tres dimensiones y que además de su dirección, también su módulo es aleatorio.



**Figura 5.4.** El desplazamiento  $\vec{D}$  de uno de los granos después de  $N$  “pasos”

En la figura se muestra esquemáticamente el desplazamiento  $\vec{D}$  de uno de los granos después de  $N$  “pasos”. De la misma manera que en el paseo al azar en una dimensión, el valor medio o el valor esperado de  $\vec{D}$  es igual a cero, esto es  $E(\vec{D}) = 0$ .

Si se repiten estos experimentos, todos con el mismo número de pasos  $N$  de duración  $\tau$ ,  $\vec{D}$  puede diferir un poco del valor esperado, que en este caso es cero. ¿En cuánto puede diferir  $\vec{D}$  de su valor esperado? La desviación del valor esperado  $\vec{\delta}$  es

$$\vec{\delta} = \vec{D} - E(\vec{D})$$

El valor esperado de  $\vec{\delta}$ , es cero. La dispersión de las variaciones de  $\vec{D}$  alrededor del valor esperado puede ser estimada calculando la dispersión cuadrática media que es el valor esperado de  $\delta^2$ ,  $E(\delta^2)$ . Como  $E(\vec{D}) = 0$ , tenemos

$$E(\delta^2) = E(D^2) = E(\vec{r}_1 + \vec{r}_2 + \vec{r}_3 + \dots + \vec{r}_i + \dots + \vec{r}_N)^2$$

Al elevar el paréntesis de la ecuación anterior al cuadrado se tienen  $N$  términos del tipo  $r_i^2$ , que es el módulo del desplazamiento  $i$  al cuadrado. También hay términos “mixtos” del tipo  $\vec{r}_i \cdot \vec{r}_j$  con  $i$  y  $j$  diferentes (el punto indica producto escalar). Hay  $N(N - 1)$  términos de este tipo, porque elegir el primero de las  $\vec{r}$  de  $N$  maneras diferentes y al segundo de  $N-1$  maneras diferentes. El valor esperado de  $r^2$  es la suma de los valores esperados de estos dos tipos de términos:

$$E(\delta^2) = E\left(\sum_{i=1}^N r_i^2\right) + E\left(\sum_{i \neq j} \vec{r}_i \cdot \vec{r}_j\right)$$

En la segunda suma los productos mezclados  $\vec{r}_i \cdot \vec{r}_j$  toman aleatoriamente cualquier valor y cualquier signo y su valor esperado para  $N$  grande es cero. Obtenemos finalmente:

$$E(\delta^2) = E\left(\sum_{i=1}^N r_i^2\right)$$

El valor esperado de la desviación cuadrática de  $\vec{\delta}$  se llama la *variancia*. Su raíz cuadrada es la *desviación estándar*  $\sigma$ , que es una buena medida de la distancia a la cual se encuentran las partículas brownianas, que comenzaron su movimiento en un punto cualquiera del fluido, después de transcurrido un tiempo  $N\tau$ :

$$\sigma = \sqrt{E\left(\sum_{i=1}^N r_i^2\right)}$$

Einstein en su trabajo del año 1905 encuentra que la dispersión cuadrática media de la posición de la partícula, que comienza a moverse desde un punto arbitrario del fluido, viene dada por:

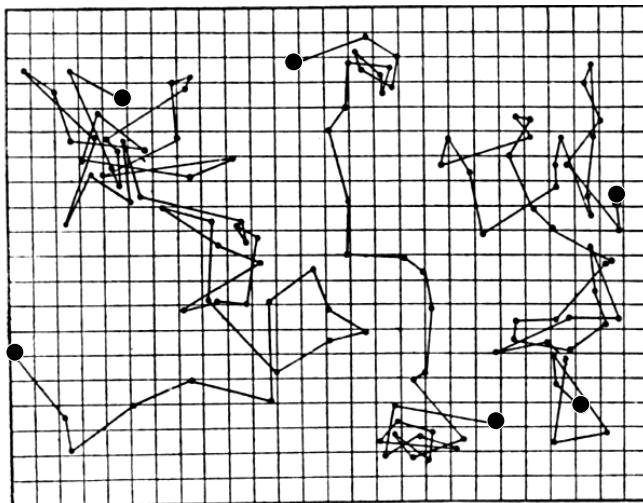
$$\sigma = \sqrt{E(D^2)} = \frac{2RT}{3\pi N_A a \eta} \tau \quad (5.1)$$

En esta ecuación,  $a$  es el radio de la partícula,  $\eta$  es el coeficiente de viscosidad del fluido donde se mueve la partícula,  $T$  la temperatura absoluta del líquido,  $R$  es la constante universal de los gases y  $N_A$  el número de Avogadro.

Einstein, en su trabajo, hace el siguiente comentario: “[...] si el movimiento aquí discutido puede llegar a ser realmente observado, entonces la termodinámica clásica no podrá ser nunca mas considerada como aplicable con máxima precisión a cuerpos muy pequeños, aun de las dimensiones distinguibles en un microscopio, y una determinación exacta de las dimensiones atómicas resultaría entonces posible. Por otro lado, si las predicciones sobre este movimiento resultan ser incorrectas, se habrá provisto de un argumento de peso contraria a la teoría cinético-molecular del calor”.

El químico-físico francés J. B. Perrin (1870-1942) era un partidario apasionado de la teoría atómica y defensor de su postura ante sus colegas. Cuando Perrin se enteró de este trabajo de Einstein sobre el movimiento browniano, comenzó a pensar sobre cómo podía medir experimentalmente la dispersión cuadrática media de una partícula

browniana. Describiremos brevemente la manera en que lo hizo. En primer lugar, hay que darse cuenta de que no es posible registrar la posición exacta de una partícula



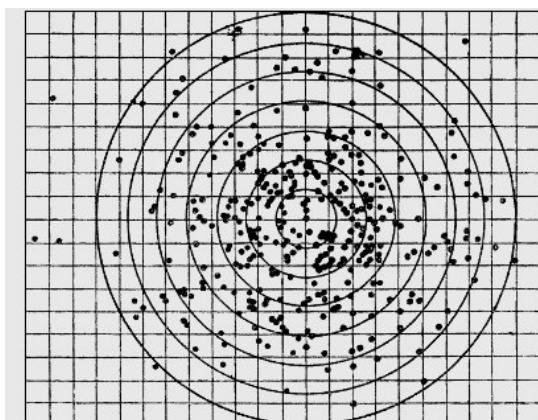
**Figura 5.5.** Las trazas de tres partículas registradas por J. Perrin. Los puntos muestran las posiciones de las partículas a intervalos de 30 segundos. Las líneas unen los puntos sucesivos. La escala de 1 división es igual a 3.125 micrones. El radio de la partícula es de 0.52 micrones.

browniana. Mediante una serie de fotografías tomadas por una cámara logró lo que se muestra en la Fig.5.5. Estos tres diagramas los confeccionó Perrin trazando las líneas que juntan las posiciones consecutivas de un grano, fotografiada cada 30 s. El diámetro del grano era de  $0.53 \mu\text{m}$ . El lado de cada uno de los cuadrados de la Fig.5.5 es de  $3,125 \mu\text{m}$ .

Perrin señaló que el diagrama de esta figura “[...] sólo da una débil idea de la prodigiosa complejidad de la trayectoria real. Si las posiciones de las partículas fueran marcadas con una frecuencia cien veces más alta, o sea cada 0.3 s, cada segmento (de la Fig.5.5) se sustituiría por un polígono más pequeño, pero el diagrama total sería igualmente complicado”. En otras palabras, la trayectoria de la partícula es infinitamente compleja e invariante ante un cambio de escala. La Fig.5.5 es una de las pocas figuras del libro de B. Mandelbrot, *La geometría fractal de la naturaleza* (1997). En este libro, Mandelbrot revela que este comentario de Perrin tuvo una gran influencia en el desarrollo de su teoría sobre la geometría fractal.

En la Fig.5.6 se muestran las 500 posiciones sucesivas del grano, tomadas cada 30 s, como si salieran de un origen común (el centro del blanco). Esta figura puede interpretarse como el desplazamiento de los granos, desde su punto de partida, después de pasar 30 s. Con estos datos se puede calcular la dispersión cuadrática media  $\sigma$  de la distribución de estos puntos y, luego, mediante la ecuación (5.1), se obtiene el número de Avogadro. Mediante mediciones de este tipo, repetidas para granos de diferentes

tamaños y con diferentes intervalos de tiempo entre fotografías, Perrin obtuvo para el número de Avogadro el valor de  $6.4 \times 10^{23}$  moléculas/mol.



**Figura 5.6.** 500 posiciones sucesivas del grano, tomadas cada 30 s, como si salieran de un origen común (el centro del blanco).

Este valor concordaba con los obtenidos por otros métodos completamente independientes, como la electrólisis, el experimento de Millikan para la razón entre la carga y la masa del electrón, la separación entre los iones de un cristal, la atenuación de la luz en la atmósfera, etc.

La determinación del número de Avogadro, por parte de Perrin, produjo un vuelco masivo en la comunidad científica en favor de la concepción atómica de la materia. La importancia del trabajo de Perrin está muy bien captada por la siguiente observación, hecha por A. Lalande, en un ensayo de 1912 sobre la filosofía francesa:

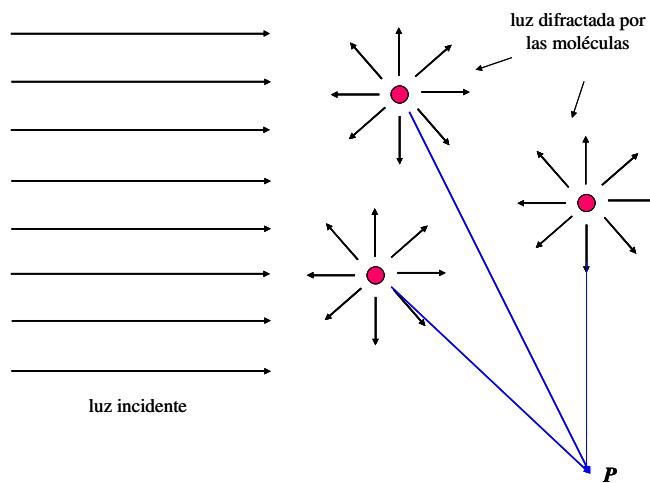
“[...] el Sr. Perrin, profesor de física en la Sorbona, ha descrito en “*Les Atomes*”, con su habitual lucidez y vigor, los recientes experimentos (en los que tuvo un papel considerable) que demuestran de manera concluyente que los átomos son realidades físicas y no concepciones simbólicas como a muchas personas les ha gustado llamarlos. Al dar medidas precisas y concordantes para su peso y dimensiones, se prueba que estos cuerpos, aunque invisibles, existen realmente y son análogos a las partículas que vemos y tocamos. Una vieja pregunta filosófica, por tanto, recibe una respuesta positiva”. Este breve comentario expresaba el sentimiento, ampliamente compartido en todo el continente europeo, de que el trabajo experimental de Perrin había terminado con las dudas acerca de la realidad de los átomos. Cuando Perrin recibió el Premio Nobel de Física en 1926, se lo presentó como la persona que “puso un fin definitivo a la larga lucha para demostrar la existencia real de las moléculas”.

Ostwald, uno de los impugnadores de la teoría atómica, escribió en 1909, en el prefacio de su libro *Grundriss der allgemeinen Chemie*: “[...] me he convencido de que hemos

entrado recientemente en posesión de la prueba experimental de la naturaleza discreta de la materia, que la hipótesis atómica había buscado en vano durante siglos, por no decir milenios".

El movimiento browniano es un ejemplo de las innumerables situaciones físicas donde no es el promedio quien determina el fenómeno, sino justamente las desviaciones respecto de la media, es decir, las fluctuaciones. En física se denomina fluctuación a una desviación aleatoria con respecto a una situación promedio, una heterogeneidad respecto de una situación homogénea.

En realidad las fluctuaciones son la quintaesencia del fenómeno atómico, pues si los átomos están debajo de todas las apariencias, el baile aleatorio de esos átomos dará por resultado fluctuaciones en muchas cantidades observables. Si el aire fuera un medio perfectamente homogéneo, un rayo de luz lo atravesaría sin cambiar su dirección. Si vemos al cielo azul es porque la luz del sol es dispersada por las fluctuaciones, en el número de átomos, en un elemento de volumen de la atmósfera.

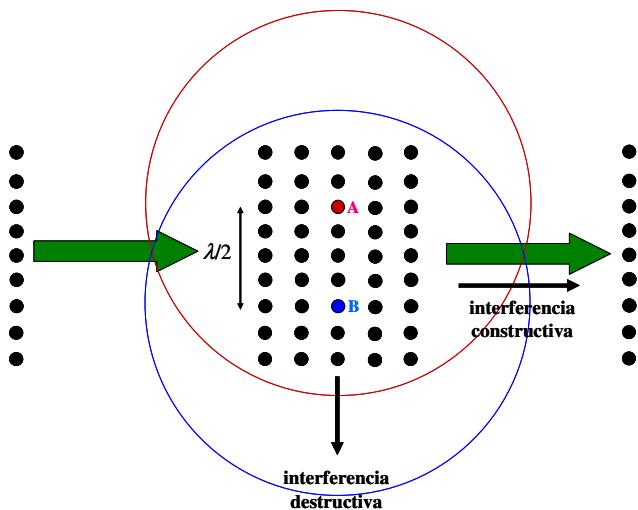


**Figura 5.7.** Cuando la luz de una cierta frecuencia entra en contacto con la materia, interactúa con cada uno de sus átomos, haciéndolos oscilar con su misma frecuencia. El átomo que oscila se convierte en una pequeña antena que emite luz en todas las direcciones

Cuando la luz de una cierta frecuencia entra en contacto con la materia, interactúa con cada uno de sus átomos, haciéndolos oscilar con su misma frecuencia. El átomo que oscila se convierte en una pequeña antena que emite luz en todas las direcciones del espacio como se muestra en la Fig.5.7. La amplitud de la onda en un punto cualquiera  $P$  se obtiene superponiendo las amplitudes, de todas las ondas dispersadas por las moléculas del medio en ese punto. La superposición de las ondas en un cierto punto del espacio se denomina *interferencia*.

El resultado de la superposición de estas ondas depende de la distribución de las moléculas en el interior de la materia. Si los átomos y moléculas están muy cerca entre

sí y, en una disposición ordenada, como en el caso de líquidos y sólidos, las fases de las ondas se mantienen relativamente constantes y la interferencia influye de manera notable en la propagación del rayo de luz en el medio material.



**Figura 5.8.** Propagación de un haz de luz a través de una serie ordenada de dispersores que están separados por una distancia mucho menor que la longitud de onda de la luz.

Para ilustrar este fenómeno, en la Fig.5.8 se muestra la propagación de un haz de luz a través de una serie ordenada de dispersores que están separados por una distancia mucho menor que la longitud de onda de la luz. En todos los frentes de ondas (superficies normales al haz de luz) las capas moleculares se activan en fase. En la figura se muestran dos moléculas A y B separadas por una distancia de media longitud de onda  $\lambda/2$ . Ambas moléculas irradian ondas esféricas. En la dirección transversal al haz, estas ondas interfieren destructivamente, mientras que en la dirección paralela al haz incidente la interferencia es constructiva. Si la longitud de onda es mucho mayor que la distancia entre las moléculas, siempre habrá parejas que tiendan a anular sus radiaciones transversales. Incluso cuando el medio no está perfectamente ordenado, la amplitud total de la onda en una dirección transversal cualquiera será la suma de un número muy grande de pequeñas ondas dispersadas, cada una de ellas algo desfasada del siguiente, que dará como resultado una cantidad muy pequeña.

Cuando más denso, uniforme y ordenado es el medio (lo más próximo a la homogeneidad), más completa será la interferencia destructiva lateral y más completa la interferencia constructiva en la dirección frontal. De este modo, la mayor parte de la energía se canalizará en la dirección frontal y el haz de luz avanzará prácticamente intacto. Eso explica por qué el haz de una linterna se propaga en el agua pura sin

pérdida de intensidad (si no tenemos en cuenta el ensanchamiento del haz debido a la difracción).

En un gas muy diluido, no se produce la cancelación por interferencia de la luz difractada transversalmente por dos moléculas separadas media longitud de onda. En estos casos habrá una dispersión transversal.

Esto es lo que ocurre en la atmósfera, pues la luz que observamos es la que ésta dispersa transversalmente. Los sólidos amorfos transparentes, como el plástico, también dispersan la luz lateralmente aunque de forma débil. Los buenos cristales, tales como el cuarzo o la mica, poseen una ordenación molecular casi perfecta y, por lo tanto, prácticamente no dispersan de manera transversal la luz. Sin embargo, cualquier tipo de imperfecciones (polvo, burbujas, defectos e impurezas), que se distribuyen aleatoriamente en el interior del medio, actúan como dispersores y, si estos son pequeños, comparado con la longitud de onda, como en el caso de la gema piedra de luna (o adularia), la luz que dispersa es azul. Como los dispersores están distribuidos aleatoriamente no se produce la compensación, por interferencia, de la luz difractada transversalmente.



**Figura 5.9.** La dispersión Rayleigh en un cristal opalescente: en sus costados se lo ve azul, pero la luz que la atraviesa es de color naranjo-amarillo,

Rayleigh supuso que las moléculas de la atmósfera estaban relativamente quietas, pero distribuidas aleatoriamente, como las impurezas en un cristal opalino y que, por ese motivo, no había cancelación por interferencia. En estos casos, la intensidad total de la luz dispersada lateralmente, se puede calcular sumando las intensidades de la luz dispersada por cada una de las moléculas: cuando no hay interferencia cada molécula funciona como una fuente independiente.

Esta suposición de Rayleigh fue severamente criticada por Mandelstam en 1907. El resumen de sus argumentos es el siguiente. La longitud de onda del color verde amarillo

(zona central del espectro visible) es del orden de  $0.5 \times 10^{-6} m$ . En la atmósfera, a 3.000 m del nivel del mar, el número de moléculas es, aproximadamente,  $N \approx 10^{25} m^{-3}$ . La distancia media entre moléculas es, entonces, del orden de  $R \approx 10^{-9} m$ . Por lo tanto, en un cubo con un lado igual a la longitud de onda del color amarillo hay aproximadamente  $10^6$  moléculas y a lo largo de una distancia de una longitud de onda, en promedio, hay 100 moléculas. En la atmósfera, entonces, entre las moléculas A y B de la Fig.7.2, en promedio, hay 50 moléculas.

Maldestan suponía que como la distancia entre moléculas  $R$  es mucho menor que la longitud de onda, entonces, el movimiento molecular en una región de tamaño menor o igual que la longitud de onda, era insignificante, que podía ser despreciado y que, por lo tanto, la atmósfera es un medio ópticamente homogéneo que no puede dispersar la luz. Esto significa que la atmósfera sería transparente y el cielo se vería negro. Esta predicción, sin embargo, es completamente contraria a nuestra experiencia. Además, la medida de la intensidad de la luz dispersada por la atmósfera es muy próxima a la que se obtiene sumando la intensidad de la dispersión producida por cada molécula como si estuviera sola. Debe existir, entonces, una razón para que la interferencia destructiva predicha por Maldestan no se produzca.

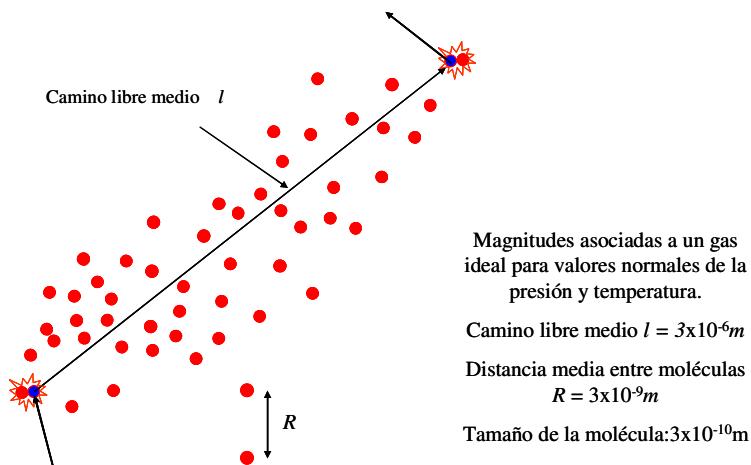
Para analizar la dispersión por una sustancia determinada debemos comprender que es lo que ocurre en los elementos de volumen cuyas dimensiones lineales son menores que la longitud de onda de la luz. Estos elementos de volumen, si bien son muy pequeños, todavía son de talla macroscópica porque encierran en su interior un número muy grande de moléculas, sobre todo en los líquidos y sólidos. Si el número de moléculas en cada uno de esos volúmenes se mantiene constante la sustancia considerada es espacialmente uniforme y siempre se podrá asociar una molécula de la región A, con otra molécula de la región B que están separadas por media longitud de onda. En este caso se anula la dispersión transversal, por interferencia, y el único efecto del medio, sobre un rayo luminoso, es hacer que este se propague en la misma dirección, con una velocidad que depende del índice de refracción.

Pero en el caso de un gas como la atmósfera, el número medio de moléculas en un pequeño elemento de volumen no es tan grande como en los sólidos y los líquidos y las fluctuaciones, del número de moléculas en ese volumen, ya no son despreciables comparado con el número medio de moléculas. Debido a estas fluctuaciones, solamente

en promedio, se puede asociar una molécula A con una molécula B. Esta es la causa por la cual se destruye la interferencia.

La suposición de Maldestan de que el movimiento de las moléculas es insignificante porque la distancia media entre moléculas  $R$  es mucho menor que la longitud de onda  $\lambda$  es incorrecta. La fluctuación del medio depende de la comparación entre el *libre camino medio* y la longitud de onda. El libre camino medio  $l$  es la distancia media que recorre la molécula entre dos colisiones (ver Fig.5.10). En la atmósfera, a 3.000 m sobre el nivel del mar,  $l$  es del orden de  $10^{-6} m$  que es aproximadamente 100 veces la distancia media entre moléculas  $R$ . El libre camino medio de una molécula, en la atmósfera, es del orden o mayor que una longitud de onda de la luz, en el rango visible. Esto significa que las moléculas tienen una gran movilidad en una región comparable con la longitud de onda. Esta es la causa por la cual, en un volumen, cuya dimensión lineal es inferior a la longitud de onda, la fluctuación del número de moléculas en su interior es muy grande.

En un líquido la distancia entre moléculas es solo un poco mayor que el diámetro de una molécula y el libre camino medio es del orden de la distancia entre moléculas. En un líquido la movilidad de las moléculas es mucho menor que en un gas, las fluctuaciones de su densidad son muy pequeñas y, en una primera aproximación, se las puede ignorar. En un sólido homogéneo las moléculas tienen aun menos movilidad.



**Figura 5.10.** El libre camino medio en un gas es mucho mayor que la distancia media entre moléculas. Esto hace que la movilidad de las moléculas sea muy grande.

Vamos a hacer una demostración algo más formal de la dispersión transversal de un rayo de luz que se propaga en un gas diluido. Si designamos con  $n$  al número de moléculas en función del tiempo, en un pequeño elemento de volumen  $V$  del aire, y con  $E(n)$  a su valor medio, se puede demostrar que,

$$E(n - E(n)) = 0 ; \quad E(n - E(n))^2 = E(n)$$

La primera ecuación, casi obvia, expresa que el valor medio de la fluctuación es cero, esto significa que  $n - E(n)$  puede tomar valores positivos o negativos con la misma probabilidad. La segunda expresa que la dispersión cuadrática media de la fluctuación del número de moléculas en un cierto volumen  $V$  es igual número medio de moléculas en ese volumen. Esta última demostración se puede encontrar en un libro de Termodinámica Estadística.

El campo eléctrico total dispersado en el punto  $P$ , por las moléculas que se encuentran en el interior del volumen  $V$ , es la suma de los campos eléctricos creados por cada una de las moléculas:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots E_n$$

Estamos suponiendo aquí que los radio vectores, que van de la posición instantánea de cada una de las moléculas al punto  $P$ , tienen el mismo módulo y son casi paralelas entre sí. Como la longitud de onda es mucho mayor que la distancia entre las moléculas siempre habrá parejas que tiendan a anular, al menos en promedio, sus radiaciones transversales. Entonces, el valor esperado, o el valor medio, del campo eléctrico en el punto  $P$  es:

$$\langle E \rangle = \langle E_1 + E_2 + E_3 + \dots E_n \rangle = 0$$

Utilizamos aquí el símbolo  $\langle \rangle$  para el valor esperado en lugar del  $E$  usado en la sección anterior para no confundirlo con la amplitud del campo eléctrico  $E$ .

La dispersión cuadrática media del campo eléctrico, alrededor de su valor medio, es:

$$\langle E^2 \rangle = \langle (E_1 + E_2 + E_3 + \dots E_n)^2 \rangle = \langle \sum_{i=1}^n E_i^2 \rangle + \langle \sum_{i \neq j} E_i E_j \rangle$$

Si la fluctuación del número de moléculas en el volumen  $V$  es muy grande, el valor medio de la suma donde aparecen los términos mezclados  $E_i E_j$  es cero. Este término es el denominado término de interferencia. Este resultado es una consecuencia del hecho de que las amplitudes del campo eléctrico creados por dos pequeños elementos de volumen no están correlacionados entre sí.

El valor cuadrático medio del campo eléctrico dispersado por la atmósfera, viene dado entonces por

$$\langle E^2 \rangle = \left\langle \sum_{i=1}^n E_i^2 \right\rangle \approx n \langle E_1^2 \rangle,$$

donde  $\langle E_1^2 \rangle$  es el valor cuadrático medio del campo eléctrico en  $P$ , creado por una sola de las moléculas del volumen  $V$ . La intensidad de la onda es proporcional al cuadrado del campo eléctrico, entonces, la intensidad media de la luz dispersada por todo el volumen  $V$  es la suma de las intensidades medias dispersadas por cada una de las moléculas de este volumen:

$$\langle I \rangle = \sum_{i=1}^n \langle I_i \rangle \approx n \langle I_1 \rangle,$$

donde  $\langle I_1 \rangle$  es el valor medio de la intensidad de una sola de las moléculas del volumen  $V$ .

Rayleigh llegó a este mismo resultado para la intensidad de la luz dispersada por las moléculas de un elemento de volumen de la atmósfera. Supuso que las moléculas estaban relativamente quietas pero que se distribuían aleatoriamente y, que por ese motivo, no había interferencia. Esta suposición no es correcta y fue el motivo de la fuerte objeción por parte de Maldestan. Sabemos ahora que la movilidad de las moléculas produce una fuerte fluctuación en el número de moléculas de un pequeño volumen de la atmósfera, y que esta fluctuación es la causa de la cancelación de la interferencia.

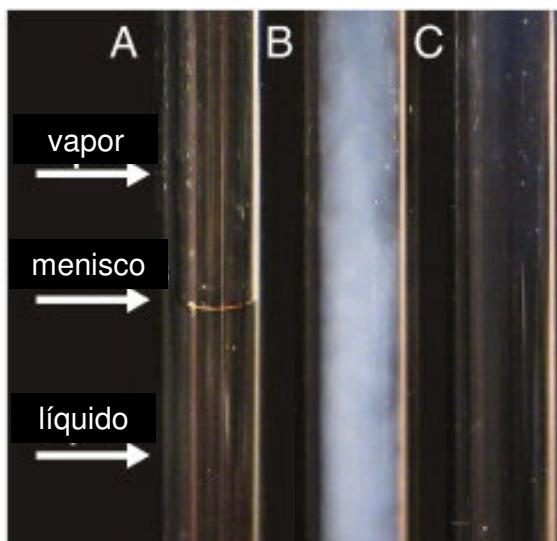
Observemos que el cálculo del valor cuadrático medio del campo eléctrico dispersado lateralmente por el volumen  $V$ , es similar al problema del paseo al azar o el de la difusión de la partícula browniana que analizamos en el capítulo anterior. De la misma manera que, para el andar del borracho y el movimiento de una partícula browniana, el promedio temporal de los “términos de interferencia” es cero.

Si el aire fuese un medio perfectamente homogéneo, no sólo el valor medio del campo eléctrico en el punto  $P$  sería cero, también sería cero la dispersión cuadrática media del campo eléctrico. En un medio homogéneo no hay dispersión lateral y el rayo continúa su camino sin atenuarse. Si el aire de la atmósfera fuera homogéneo los rayos del sol no se dispersarían lateralmente y el cielo sería transparente. El cielo se vería negro igual que en la luna.

Si vemos un cielo puro y calmo de color azul, es porque la luz del sol es dispersada por las fluctuaciones del aire, esto es, por las desviaciones cuadráticas medias de su densidad respecto de su valor medio.

El color del cielo tiene una sorprendente analogía con un fenómeno al que se le da el nombre de *opalescencia crítica*. El fenómeno de la *opalescencia crítica* le había llamado la atención a Einstein en su época de estudiante en la Escuela Politécnica de Zürich. Después de una clase, donde se habló de este fenómeno, apuntó en el margen de su cuaderno “*punto oscuro*” y se sintió muy atraído por este fenómeno que su profesor encontraba misterioso.

La opalescencia crítica fue descubierta por T. Andrews en 1869 cuando estudiaba el comportamiento del dióxido de carbono cerca de su punto crítico, es decir, a la temperatura más elevada en la cual se puede pasar del estado gaseoso al líquido, independientemente de la presión. Andrews advirtió que, muy cerca de su temperatura crítica ( $31^{\circ}\text{ C}$ ), súbitamente el dióxido de carbono se vuelve muy turbio y adquiere un color algo azul.



**Figura 5.11.** En (A) se muestra un tubo que contiene vapor y líquido presurizado de dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  a temperatura ambiente, inferior a la temperatura crítica. El menisco que separa las fases líquida y gaseosa es claramente visible. En (B) el menisco desaparece cuando la temperatura llega al punto crítico. La turbiedad azulada que se observa es la que se denomina opalescencia crítica. En (C), con una temperatura superior a la temperatura crítica todo el tubo se llena con una sola fase fluida.

A este fenómeno se lo llamó opalescencia crítica debido a su semejanza con la apariencia lechosa de una piedra de ópalo. En la Fig.5.11, (A) es un tubo que contiene vapor y líquido presurizado de dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  a temperatura ambiente, inferior a la temperatura crítica. El menisco que separa las fases líquida y gaseosa es claramente visible. (B) El menisco desaparece cuando la temperatura llega al punto crítico. La turbiedad azulada que se observa es la que se denomina opalescencia crítica. (C) Arriba de la temperatura crítica, todo el tubo se llena con una sola fase fluida. M

Smoluchowski (1872-1917), en 1907, atribuyó el fenómeno de *opalescencia crítica* a las grandes fluctuaciones de la densidad que tienen lugar cuando la sustancia se acerca a su punto crítico. Sostenía que las moléculas de la fase gaseosa se reagrupaban en una nueva configuración espacial, formando diminutos glóbulos líquidos que invadían el gas como si fuera un coloide. Sus investigaciones también incluían los estudios del color del cielo como consecuencia de la dispersión de la luz por fluctuaciones de densidad de la atmósfera. Esto lo llevó a interrogarse sobre cuál es la causa *real* del azul del cielo: las propias moléculas o las fluctuaciones de la densidad.

Einstein después de sus cálculos detallados sobre el movimiento browniano estaba muy bien preparado para deducir la dispersión de la luz producida por las fluctuaciones en la densidad y los utilizó en 1910 para explicar la opalescencia crítica. La ley de dispersión que encontró era muy semejante a la ley de dispersión de Rayleigh. Einstein calculó que la intensidad de la luz dispersada por un fluido opalescente es inversamente proporcional a la longitud de onda elevada a la cuarta, al número de Avogadro  $N_A$  y también incluía factores dependientes de la temperatura, la presión y el índice de refracción. La teoría obtenida está muy de acuerdo con los experimentos. Como sospechaba Smoluchowsky, el cielo azul y un fluido opalescente siguen la misma ley básica, incluyendo la polarización de la luz dispersada. La teoría de Einstein, sin embargo, explicó el fenómeno sin tener en cuenta la estructura detallada de la materia.

Einstein manifestó que “[...] es *remarcable* que nuestra teoría no hace un uso directo de la suposición de una distribución discreta de la materia”. A pesar de sus esfuerzos por demostrar la realidad de los átomos, la explicación que dio Einstein de la opalescencia crítica fue utilizada por los escasos detractores de la teoría atómica, para apoyar sus ideas de que la materia es continua y que los fenómenos, como el movimiento browniano o el cielo azul, son causados por fluctuaciones de la densidad o del índice de refracción de un medio continuo y que no era necesario acudir a los átomos para encontrarles una explicación. Ahora, si bien Einstein no utilizó en su deducción la hipótesis atómica esto no significa que la refutó.

En 1911, Smoluchowski le envió a Einstein un trabajo donde atribuía el color del cielo a dos causas: la dispersión de Rayleigh provocada por las moléculas del aire y por otra dispersión, que él creyó que era una dispersión muy diferente, producida por las fluctuaciones en la densidad. Einstein le respondió de inmediato para decirle que “[...] no existe una opalescencia molecular además de la opalescencia de la fluctuación”.

Einstein hizo hincapié en que las fluctuaciones se deben a las moléculas, que ambas cosas están vinculadas indisolublemente, de modo que éstas (las fluctuaciones) son el signo más concreto y accesible de la realidad molecular.

Smoluchowski respondió a la carta de Einstein: “[...] *tiene usted toda la razón*”. A pesar de esto, la falsa afirmación de que la causa del cielo azul son “*realmente*” las fluctuaciones y no las moléculas, fue repetida innumerables veces, a pesar de la refutación de Einstein en 1911, afirmando que “[...] *una molécula puede golpear una superficie o dispersar la luz, mientras que una fluctuación no puede hacerlo; las moléculas son físicamente reales mientras que la fluctuación es un concepto estadístico*”.

La expresión que Einstein dedujo, sin utilizar explícitamente la dispersión por moléculas, puede obtenerse también desde un punto de vista molecular. Esto fue hecho recién en 1945 por J. Zymm.

Si bien la dispersión Rayleigh ha sido extensamente analizada, permanecen algunas ambigüedades, una de estas es que la dispersión lateral de  $N$  moléculas de un gas diluido es  $N$  veces la dispersión de una, mientras que en un cristal, la dispersión lateral es nula. Ahora, ¿cómo las correlaciones entre partículas reducen las fluctuaciones en la densidad y la dispersión lateral? ¿Cómo dispersa un medio cuya fluctuación en la densidad es mucho menor que un gas ideal, pero mucho mayor que un cristal? Este aspecto, interesante, es tratado en un trabajo de A.G. Rojo y P. R. Berman del año 2009. Lo mencionamos para señalar que la explicación del cielo azul no está aún totalmente clausurada.

# 6

## El brillo del cielo y la visión de los colores

Dado que las fuentes de luz que nos iluminan desde el cielo son el sol y el “propio” cielo, es importante conocer la cantidad y calidad de la luz natural de cada una de ellas. En esta sección vamos a analizar el brillo y la composición espectral de estas fuentes.

En nuestro lenguaje cotidiano designamos como “luz del sol” a la radiación solar directa y como “luz del cielo” a la radiación solar difusa. Las diferencias más importantes son su intensidad y su espectro. A la luz del sol la podemos considerar como un haz de luz, altamente direccional que proviene de una fuente casi puntual. La luz del cielo, por otra parte, es emitida por la atmósfera desde una gran “superficie” semiesférica, y nos llega de manera difusa desde todas las direcciones. La luz difusa de la atmósfera realmente no proviene de una superficie, sino de todo el volumen de la atmósfera que se extiende hasta un poco más de 15 Km, aunque veremos más adelante que en algunas horas del día la luz difusa que proviene de la capa de ozono que se extiende desde los 15 Km hasta los 40 Km puede ser significativa, por lo menos para darle un matiz de color.

La luz del sol es una fuente muy intensa. La intensidad de la luz solar varía con la época del año y nuestra ubicación en el planeta. Utilizamos el término "luz del cielo" tanto para designar la luz de un cielo despejado como de uno con nubes. En algunas circunstancias en un día de cielo nublado la iluminación difusa puede ser mucho más brillante que cuando el cielo es azul. Una nube está compuesta por gotitas de agua que tienen un diámetro entre mayor y mucho mayor que la longitud de onda y reflejan o dispersan la luz del sol incidente de acuerdo con una ley de dispersión conocida como “dispersión Mie”. En el próximo capítulo vamos a comparar la dispersión Mie con la dispersión Rayleigh.

Tanto el cielo como el sol pueden considerarse fuentes luminosas y su luminosidad puede ser medida con las mismas unidades usadas para caracterizar las fuentes luminosas que utilizamos en nuestra vida diaria.

La unidad de intensidad de la luz visible es la *candela*. Su brillo es aproximadamente igual a la de una vela ordinaria. La candela estándar, por definición, presenta una potencia total de salida de aproximadamente  $18.4 \text{ mW}$  (miliwatos) de luz visible, medida a la frecuencia de  $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ , que corresponde a una longitud de onda de  $555 \text{ nm}$  cuyo color está entre el amarillo y el verde.

$$1 \text{ cd} = 1 \text{ candela} \approx 18.4 \text{ mW} \text{ de luz visible}$$

Cada elemento de la superficie de la llama de una vela irradia luz en todas las direcciones. Cuando uno mira su superficie todos los puntos de su superficie parecen

**Tabla I.** Luminancia de algunas superficies

Superficie	Luminancia (Cd/m <sup>2</sup> )
Sol	$1.6 \times 10^9$
Cielo azul (valor medio)	$5 \times 10^3$
Cielo con nubes	$2 \times 10^3$
Luna	$2.5 \times 10^3$
Vela	$0.5 \times 10^4$

igualmente brillantes. Esto sucede también cuando se observa la luna, un pedazo de papel blanco y el sol.

El brillo o luminancia de una superficie se define como la energía que emite por unidad de superficie por unidad de tiempo. Sus unidades son watios de luz visible por unidad de superficie o candelas por unidad de superficie. La llama de una vela ordinaria presenta una superficie de aproximadamente  $2 \text{ cm}^2$  y como la potencia emitida es de una candela, su brillo viene

dado por

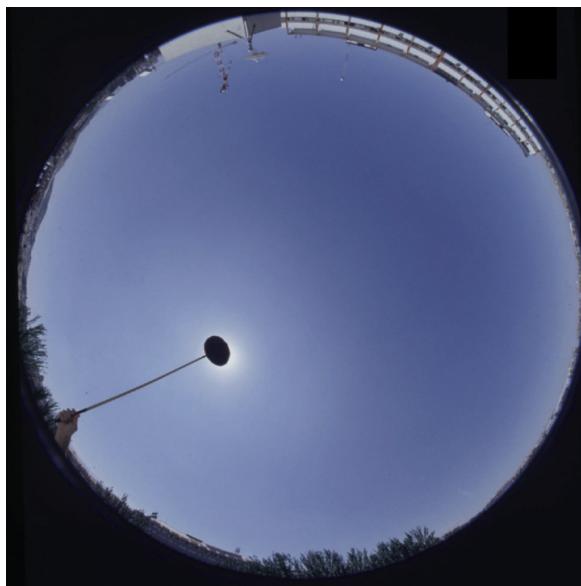
$$\text{Brillo o luminancia de una vela} \approx \frac{1 \text{ cd}}{2 \text{ cm}^2} = 0.5 \cdot 10^4 \text{ cd/m}^2 \approx 92 \text{ W/m}^2$$

La percepción visual del ser humano no es uniforme para todas las longitudes de onda visibles. Esto significa que una determinada potencia lumínica produce diferentes sensaciones en diferentes longitudes de onda: una cierta intensidad de luz roja no produce la misma sensación que la misma intensidad de azul. Para tener esto en cuenta se define la luminancia como un promedio de la potencia lumínica ponderada por la sensibilidad de la visión.

Cuando observamos un objeto luminoso de gran superficie, podemos distinguir diferentes puntos de su superficie y la impresión luminosa depende de la potencia que

llega al ojo, de esta parte de la superficie, en el interior de un cono con un ángulo sólido  $\Delta\Omega$ , que es el límite de la resolución angular del ojo. El límite de la resolución angular de un ojo normal es de orden de 1 minuto, o sea de aproximadamente  $10^{-4}$  radianes, y espacialmente, esto corresponde, a un ángulo sólido de  $0.8 \cdot 10^{-8} \text{ sr}$  (*stereoradianes*). El sol (y la luna) subtienden un ángulo de  $0.5^\circ = 30'$  o sea un ángulo sólido de  $6.6 \times 10^{-5}$ . Si miramos la luna (no al sol porque es muy peligroso) podemos distinguir en su superficie  $6.6 \times 10^{-5} / 0.8 \times 10^{-8} \approx 8.000$  “puntos”. Se la puede considerar entonces como un objeto luminoso de superficie extensa.

El brillo o luminancia de la luna y del sol es prácticamente constante en cada uno de sus puntos. La luz del cielo, por otra parte, es sorprendentemente no uniforme. Es más oscuro en direcciones que están a  $90^\circ$  de la dirección del sol y más brillante, alrededor del sol, y en el horizonte.



**Figura 6.1.** Foto del cielo con una lente gran angular que cubre todo el cielo. Para evitar problemas de exposición se puso la lente de la cámara a la sombra de la luz directa del sol.

En la Fig.6.1 se muestra una foto del cielo tomada con una lente gran angular que cubre todo el cielo hasta un ángulo de  $60^\circ$  medidos a partir del cenit. Para evitar problemas de exposición y los reflejos producidos por la luz directa del sol, se colocó la lente de la cámara en la sombra ocasionada por un pequeño disco unido a un poste delgado.

Los valores de la luminancia del cielo y de la luna permiten explicar por qué podemos observar a la luna, durante un día sin nubes, a las 3 PM, como se muestra en la Fig. 6.2. La luminancia de la luna ( $2.500 \text{ cd/m}^2$ ) es comparable con la luminancia del cielo ( $5.000 \text{ cd/m}^2$ ), esta diferencia de un factor dos es despreciable teniendo en cuenta que la visión (ojo + cerebro) es un detector logarítmico. Esto permite que veamos a la luna a través de

la atmósfera. Si el espacio exterior tuviera una luminancia comparable o mayor que la luna no veríamos la atmósfera.

Las cifras de luminancia de la Tabla 1 muestran que la luz dispersada por la atmósfera es pequeña comparada con la cantidad total de luz que llega directamente a la Tierra desde el Sol. La luz dispersada parece mucho más brillante e intensa de lo que es en realidad porque la vemos contra el fondo oscuro del vacío que queda más allá de la atmósfera.



**Figura 6.2.** Foto de la luna en un día sin nubes.

Como ya lo señaló Leonardo (ver Capítulo 1) visto desde la cima de una montaña elevada - o desde un avión - el cenit es sensiblemente más azul, aunque mucho menos



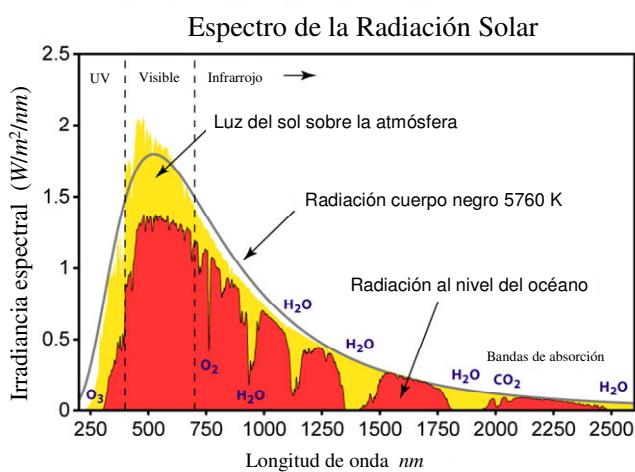
**Figura 6.3.** La Tierra vista desde una altura de 300 Km.

brillante que la atmósfera que está sobre el nivel del mar. A medida que aumentamos la altitud, la atmósfera se hace menos brillante hasta que alcanzamos el borde de la atmósfera, lugar en que el cielo se torna completamente oscuro. De hecho, un avión es el mejor lugar para observar la variación en el color y en el brillo de un cielo despejado. Un buen entretenimiento, si se viaja en avión, puede ser mirar por la ventanilla y comparar el horizonte con el cenit.

Cuando se observa a la Tierra desde el exterior lo que está detrás de la atmósfera no es un fondo oscuro, sino la propia Tierra que también refleja luz hacia el espacio exterior.

La luz que refleja la superficie de la Tierra hacia el espacio exterior es comparable (un poco inferior) a la luz que dispersa la atmósfera hacia el exterior. Así como desde la Tierra, podemos observar la luna, desde el espacio exterior podemos observar la superficie terrestre y distinguir los desiertos, las selvas, las montañas y el mar. En la Fig.6.3 se muestra una foto de la superficie de la Tierra desde un satélite que está a 300 Km de altura. Se observa una zona casi desértica, otra zona con algo de verde, el mar de color oscuro algo azulado, una colonia de algas de color verde y un poco de nubes blancas. En el horizonte terrestre se percibe un lindo color azul: es la atmósfera de la Tierra. Ahí se la observa muy bien porque detrás está el negro del espacio vacío. En esta foto, el sol está hacia la derecha.

Vamos a examinar a continuación cómo el cerebro participa en el proceso de percepción del color azul del cielo. Cuando escuchamos un sonido, que es una combinación de varios tonos de longitudes de ondas diferentes, podemos identificar, o aislar, las diferentes longitudes de onda (o frecuencias) que componen dicho sonido. Se dice por esto que el oído funciona como un *analizador Fourier*. Sin embargo, si advertimos una mezcla de colores de diferentes longitudes de onda, el ojo (+ el cerebro) las integra en una única sensación. Por ejemplo, al observar una mezcla de todos los colores del espectro visible el resultado es la sensación del color blanco.



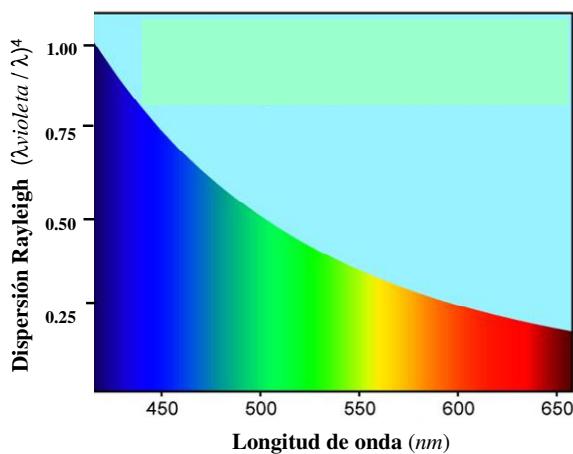
**Figura 6.4.** Radiación solar *directa*, tanto en la parte superior de la atmósfera de la Tierra como en el nivel del mar. En la gráfica se indican las regiones correspondientes a luz ultravioleta, visible e infrarrojo.

Hasta aquí decíamos que el cielo es azul, ahora, ¿el azul del cielo tiene solamente las longitudes de onda que corresponden a los colores azules? ¿qué otros colores participan en el color del cielo? Por otra parte, de acuerdo con la teoría de Rayleigh las moléculas

dispersan más el violeta que el azul, entonces, ¿por qué el cielo no es violeta? Tal vez el propio Rayleigh se haría esta última pregunta.

Hay por lo menos dos razones importantes para explicar por qué finalmente vemos al cielo azul y no violeta: en primer lugar, la intensidad de la radiación de la luz solar a nivel del mar no se distribuye uniformemente sobre todas las longitudes de onda y, en segundo lugar, el ojo (+ el cerebro) perciben de distinta manera los diferentes colores.

En la Fig.6.4 se muestra el espectro de la radiación solar *directa*, tanto en la parte superior de la atmósfera de la Tierra como en el nivel del mar. En la gráfica se indican las regiones correspondientes a luz ultravioleta, visible e infrarrojo. El espectro de la *radiación solar directa* es similar al espectro de un cuerpo negro que está a una temperatura de  $5760\text{ K}$ , que es aproximadamente la temperatura de la superficie del Sol. Cuando la luz pasa a través de la atmósfera, parte es absorbida por los gases, en bandas de longitud de onda específicas. Se observa en la Fig.6.4 que la irradiancia solar directa, sobre el nivel del mar, en el extremo violeta del espectro, es menor que en el intervalo de frecuencias que corresponde al azul, en parte porque el sol emite menos en el violeta que en el azul y, en parte, debido a que ciertos elementos de la atmósfera como el  $\text{O}_3$  (ozono) absorben las longitudes de onda violetas y ultravioletas. Esto parecería resolver el enigma de por qué el cielo no es violeta. Sin embargo, cuando miramos el cielo, la luz que penetra en nuestros ojos no es la radiación solar directa, sino la *radiación solar difusa* o radiación del cielo.



**Figura 6.5.** Dispersión Rayleigh: longitud de onda del violeta/longitud de onda a la cuarta, en función de la longitud de onda.

El espectro de la radiación solar *difusa*, es el espectro de la luz dispersada por la atmósfera. En la Fig.6.6, se grafica la radiación solar dispersada por toda la bóveda del cielo sobre una superficie horizontal de  $1\text{ m}^2$ , por unidad de intervalo de longitudes de onda, en función de la longitud de onda. La radiación solar difusa se obtiene

multiplicando la radiación solar directa (Fig.6.4) por la ley de inversa a la longitud de onda a la cuarta (Fig.6.5). Claramente la irradiancia solar difusa es más grande para las longitudes de ondas más cortas, el extremo azul del espectro, de modo que la gráfica de la Fig.6.6 se utiliza a menudo como la explicación para el cielo azul. Pero el máximo de la irradiancia solar difusa está en aproximadamente 420 nm, que corresponde al violeta. Esto implica que el misterio del cielo azul y no violeta, sigue en pie, y que estamos obligados a pensar que percibimos finalmente al cielo de color azul y no violeta, debido a la sensibilidadpectral de nuestros ojos (y el cerebro). Esto nos lleva a analizar con un poco más de detalle la percepción de los colores por un ser humano.



**Figura 6.6.** Radiación solar difusa, en unidades relativas, en función de la longitud de onda.

La visión del color es la capacidad de un organismo o una máquina para distinguir un objeto en función de las longitudes de onda (o frecuencias) de la luz que reflejan, emiten o transmiten. Los colores se pueden medir y cuantificar de distintas maneras, de hecho, la percepción de un ser humano de los colores es un proceso subjetivo mediante el cual el cerebro responde a los estímulos que se producen cuando la luz entra en el ojo.

Al igual que nuestros sentidos del gusto y el olfato, el color nos ayuda a comprender el mundo que nos rodea. Además de darnos habilidades elementales de supervivencia, el color también enriquece nuestras vidas, pues nos permite apreciar desde la belleza de un arco iris hasta el placer estético de una pintura.

A fines del siglo XVII se consideraba el color como una propiedad intrínseca de los propios objetos y la luz del Sol sólo servía para iluminar lo que ya estaba allí. Sin embargo, Newton demostró que la luz del Sol está compuesta por varios colores, y que un objeto adquiere su color a partir de la luz que lo ilumina. Si el Sol comenzara a emitir únicamente en una banda de longitud de onda muy estrecha centrada en el

amarillo, la gran variedad de colores que observamos en la Tierra desaparecería inmediatamente y ¡todos los objetos se verían amarillos o negros!

Newton descubrió que la luz blanca se descompone en sus colores componentes cuando pasa a través de un prisma. Los colores característicos de esta descomposición son: de mayor a menor longitud de onda: rojo, naranja, amarillo, verde, azul, añil, violeta. Las diferencias en la longitud de onda dan lugar a una diferencia en la tonalidad percibida; se observan diferencias en el tono cuando la longitud de onda varía aproximadamente 1 *nm* en el rango de las longitudes de onda azul-verde y amarillo pero deben variar de 10 *nm* y más en el rojo y azul. Se pueden discriminar 500 niveles de brillo (o de intensidad de luz) mientras que se pueden diferenciar más de 7 millones de graduaciones de color, si se varía la intensidad y la saturación, o proporción de blanco, de los 150 colores que percibimos entre 380 y 700 *nm*.

Newton, afirmaba que los objetos tienen un tono particular porque reflejan algunos colores más que otros. Una manzana roja es roja porque refleja los rayos del extremo rojo del espectro y absorbe los rayos del extremo azul. Un arándano, por otra parte, refleja fuertemente el extremo azul del espectro y absorbe el rojo. La percepción del color depende tanto de las longitudes de onda de luz que refleja la superficie del objeto, como de la composición espectral de la fuente de iluminación, del área circundante al objeto y del estado de adaptación del observador.

La mezcla de colores le creó algunos problemas que nunca pudo resolver. Incluso en su primer trabajo publicado sobre el tema, en 1671, admitió que una mezcla de dos rayos de diferente refrangibilidad podría coincidir con el color producido por la luz homogénea, la luz de una sola refrangibilidad. Con la palabra refrangibilidad, Newton y sus contemporáneos querían caracterizar a un rayo que se refractaba en un ángulo definido, es decir, que tiene un color “puro”. Así, una mezcla de rojo y amarillo se vuelve naranja, de verde y naranja se vuelve amarilla, y las mezclas de otros pares de colores espectrales coinciden, igualmente, en un color intermedio, siempre que las componentes de la pareja no estén muy separadas en el espectro. “[...] porque en estas mezclas, los colores que la componen no aparecen, se mitigan mutuamente entre sí, dando lugar a un color intermedio”.

Los colores que parecen ser el mismo para el ojo pueden ser homogéneos o compuestos, y la única manera de distinguirlos es descomponerlos con un prisma.

El blanco presenta una dificultad especial. En su primer documento, Newton (1671) escribió sobre el blanco: “[...] *no hay un solo tipo de rayos que por sí solo puede exhibir este color. Está siempre compuesto, y para obtener el blanco son necesarios todos los colores primarios*”. Esta afirmación fue impugnada rápidamente por Huygens (1673), quien sugirió que sólo dos colores (amarillo y azul) son suficientes para producir el blanco. Existen otros pares de luces que se pueden mezclar para que se obtenga blanco, pero su existencia se comprobó recién en el siglo XIX. Newton negó que se necesitaran sólo dos colores para obtener blanco, pero el intercambio de cartas con Huygens le obligó a modificar su posición y admitir finalmente que el blanco podía obtenerse con un número pequeño de componentes.

La propiedad más importante de la visión del color de los seres humanos es explicada por la *teoría tricromática*, que esencialmente postula que tres diferentes colores primarios de luces pueden mezclarse para producir cualquier otro color.

La mezcla tricromática del color, de hecho, se debe a que hay sólo tres tipos de receptores de colores en una retina normal. Se los conoce como conos de onda corta, onda media y onda larga, aunque cada uno tiene una bandapectral ancha que se superponen,

Esta propiedad de la visión fue reconocida, en una forma simplificada, durante la vida de Newton. Antes de la teoría de los tres receptores, se creía que la característica tricromática de la visión era una propiedad física de la luz, más que un hecho relacionado con la fisiología. Este error de categoría retrazó la comprensión de la óptica de los colores.

Todos los elementos conceptuales de la teoría tricromática estaban disponibles en el primer cuarto del siglo XVIII. Sin embargo, la síntesis final sólo la logró en 1801, T. Young, quien en ese año, en una conferencia ante la Royal Society, presentó la teoría tricromática de la visión de una manera coherente. Young llegó a la conclusión de que la retina, en la parte posterior del ojo, no podía tener un receptor diferente para cada tipo de luz, porque hay un continuo de colores en el intervalo que va del rojo al violeta. No concebía la idea de que podría haber un número tan grande de receptores específicos. Por este motivo, propuso que los colores se perciben a través de un sencillo código de tres colores. Como bien sabían los artistas/maestros pintores, cualquier color del espectro puede obtenerse mediante una mezcla adecuada de sólo tres colores de pintura. Young sugirió que esto no era una propiedad intrínseca de la luz, sino que surge

de la actividad combinada de tres diferentes “receptores” en la retina, cada uno sensible a las diferentes partes del espectro.

*“[...] ahora, ya que es imposible concebir que la retina contenga un número infinito de partículas sensibles, cada una capaz de vibrar al unísono con cada una de las ondulaciones posibles de la luz, se hace necesario suponer que este número está limitado, por ejemplo, a los tres principales colores: rojo, amarillo y azul ... las ondulaciones de la luz verde, afectarán por igual a las partículas del amarillo y el azul, para producir el mismo efecto que una luz compuesta de esas dos especies: y cada filamento sensible del nervio puede constar de tres partes, una para cada color principal”.*

Young no pudo determinar la sensibilidad espectral de los tres receptores, pero superó el error de categoría que había frenado la ciencia del color desde Newton. Maxwell diría más tarde, en una conferencia en la Royal Institution: “*Hasta donde yo sé, Thomas Young fue el primero que, a partir del hecho bien conocido de que hay tres colores primarios, ha buscado la respuesta de este hecho, no en la naturaleza de la luz, sino en la constitución de una persona*”.

En su obra *Óptica Fisiológica* (1856), Herman Helmholtz (1821-1894) amplió la teoría de la visión tricromática de Young al proponer la existencia de tres fotopigmentos en la retina, que absorben las longitudes de onda azul, verde, y roja, lo que explica la mayoría de las particularidades de la visión del color y en especial el mecanismo de percepción de la mezcla de colores. Mientras Newton retiró el color de los objetos, Young y Helmholtz lo instalan dentro de la compleja fisiología de la retina.

Las pantallas electrónicas aprovechan este aspecto tricromático del color: variando las intensidades de tres colores (los subpixeles rojo, verde y azul), se obtiene un rango casi completo de colores. El trío de colores, rojo - verde - azul, se considera idealmente como el conjunto de colores primarios de la luz, ya que con ellos se puede obtener una gama muy amplia de colores visibles. Si se mezcla a los tres en iguales intensidades (adición) se consiguen grises claros, que tienden idealmente al blanco.

No hay limitaciones sobre los colores que pueden utilizarse como colores primarios, pueden ser monocromáticas o ellos mismos mezclas de longitudes de onda, es decir luces heterogéneas. Sin embargo, las tres luces variables que se eligen son tradicionalmente llamados “primarios”, y gran parte de la confusión histórica en la

ciencia del color se produjo porque no se realizó una clara distinción entre los colores primarios utilizados en los experimentos de mezcla de color. Por ejemplo, a los colores como el rojo y amarillo a menudo se los llama “primarios” porque reconocemos en ellos una sola cualidad subjetiva, mientras que la mayoría de la gente reconoce en el naranja las cualidades tanto de “naranja enrojecida” como del “naranja amarillento”.

En la síntesis aditiva (ver Fig.6.7), la mezcla de los colores primarios ideales da los siguientes resultados:

- Luz roja + luz verde = luz amarilla.
- Luz verde + luz azul = luz cian.
- Luz azul violeta + luz roja = luz magenta.



**Figura 6.7.** Con tres colores de luces se pueden producir todos otros los colores.

Las luces o colores complementarios están formadas por parejas de luces de colores cuyos componentes cromáticos son opuestos; por ejemplo, la luz amarilla (compuesta por luz verde más luz roja) es complementaria de la luz azul. Cuando se mezclan dos luces complementarias al 50%, producen una luz casi blanca. Una luz primaria (roja, verde o azul) con una luz secundaria opuesta (amarilla, cian o magenta) completan las tres luces primarias:

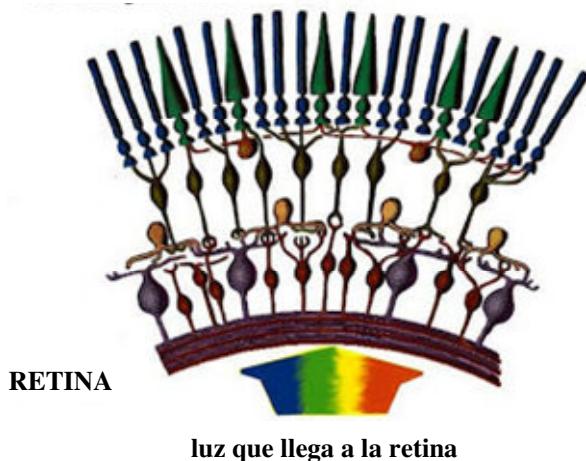
- La luz amarilla (roja + verde) es complementaria de la luz azul.
- La luz cian (azul violeta + verde) es complementaria de la luz roja.

Los colores complementarios explican por qué Huygens le manifestaba a Newton que con solo dos colores (amarillo y azul) se podía producir el blanco. El amarillo que utilizaba Huygens era en realidad una mezcla del rojo con el verde.

Helmholtz (1852) fue el primero en aclarar la distinción entre la mezcla por sustracción de los pigmentos y la mezcla aditiva de las luces de colores. Los pigmentos absorben la luz, por ejemplo, un pigmento rojo absorbe el verde y el azul y refleja el rojo. La adición de los pigmentos rojo, verde y azul da como resultado el negro.

Fue recién en 1965 que se descubrió que la visión del color, en los seres humanos, depende de la interacción de tres tipos de conos: especialmente sensibles, uno a la luz roja, otro a la luz verde y un tercero a la luz azul. En la retina hay tres tipos de conos sensibles a tres espectros diferentes, dando lugar a una visión de color *tricromática*. Es notable como Young y Helmholtz descubrieron la teoría tricromática antes de que se descubrieran los conos en la retina.

**conos y bastones**



**Figura 6.8.** Los conos y los bastones en la retina.

La retina contiene dos tipos de fotorreceptores, los conos y los bastones (Fig. 6.8). Los bastones son los más numerosos, hay aproximadamente 120 millones y son más sensibles que los conos. Sin embargo, no son sensibles al color. Los 6 a 7 millones de conos proporcionan la sensibilidad del color y están muy concentrados en el punto central amarillo de la retina conocida como la mácula.

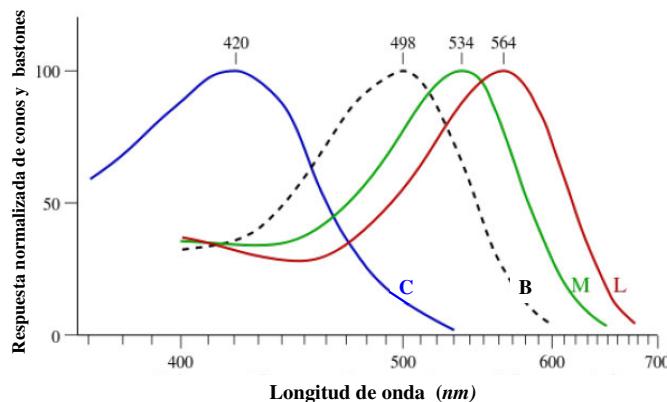
Si el nivel de luz es muy bajo (menor que  $0.25 \text{ cd/m}^2$ ), la visión es *escotópica*: la luz es detectada por las células tipo *bastón* de la retina. Los *bastones* tienen su máxima sensibilidad a las longitudes de onda del orden de  $500 \text{ nm}$ , y juegan un papel muy pequeño en la visión del color. La visión escotópica carece de color, es monocromática dentro de la escala del grises, desde el blanco al negro.

En condiciones de buena iluminación (más de  $3 \text{ cd/m}^2$ ), como a la luz del día, la visión es *fotópica*: la luz es detectada por las células tipo *cono*, que son responsables de la visión del color. Entre estos dos límites, entra en juego la visión *mesópica* en la que tanto los conos como los bastones proporcionan señales a las *células ganglionares* de la retina.

Los conos son convencionalmente etiquetados de acuerdo con las longitudes de onda de los picos de sus sensibilidades espectrales como conos corto (C), mediano (M) y largo

(L). En la Fig.6.9 se muestra la sensibilidad de los conos y bastones en función de la longitud de onda. La percepción del color se consigue mediante un proceso complejo que comienza con la salida diferencial de estas células en la retina y finaliza en la corteza visual y otras áreas asociadas del cerebro.

Aun cuando a los conos L se los llama sin más, receptores rojos, su pico de sensibilidad está en la región verde-amarillo del espectro. Del mismo modo, los conos C -y M- no se corresponden directamente con el azul y verde, aunque a menudo se los llama conos o receptores azules y verdes.



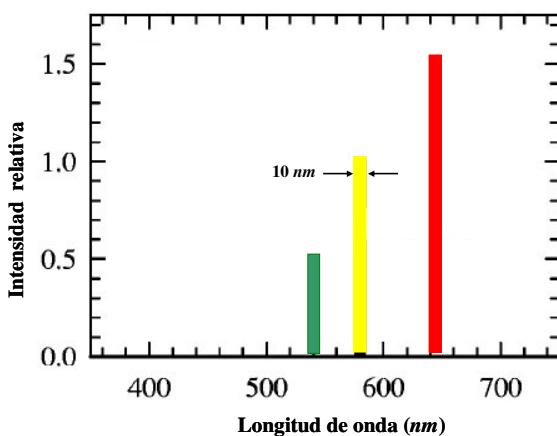
**Figura 6.9.** Sensibilidad de los conos: corto (C), mediano (M) y largo (L), y de los bastones (B), en unidades arbitrarias, en función de la longitud de onda.

Cada curva de la Fig.6.9 puede ser pensada como la respuesta relativa de los conos en función de la longitud de onda de la luz que entra en el ojo. Nótese que la respuesta de un solo tipo de cono no contiene ningún tipo de información acerca de la longitud de onda de la excitación. Esto implica que es imposible asociar una longitud de onda particular con un dado nivel de respuesta. Si la entrada es una luz monocromática se tendrá en general una respuesta de los tres tipos de conos simultáneamente.

Un rango de longitudes de onda de la luz estimula cada uno de estos tipos de receptores en distintos grados. Una mezcla de luz amarillo+verde, por ejemplo, estimula tanto los conos L y M con la misma intensidad, pero sólo estimula los conos C muy débilmente. La luz roja, en cambio, estimula los conos L mucho más que los conos M y a los conos C casi nada. La luz azul + verde estimula los conos M más que a los conos L, y a los conos S un poco más intensamente, y producen también un estímulo de las células de tipo bastón (que tienen un pico de respuesta en ese rango de frecuencias). La luz azul estimula los conos C con más intensidad que la luz roja o verde, pero mucho más débilmente a los conos L y M. El cerebro combina la información de cada tipo de

receptor para dar lugar a diferentes percepciones de las diferentes longitudes de onda de la luz.

Cada tipo de cono informa sólo la intensidad total de luz que está absorbiendo. Por lo tanto para lograr una coincidencia entre los colores de dos objetos muy próximos, cuyas imágenes se forman en dos zonas adyacentes de la retina del observador, los estímulos que producen en el triplete de conos debe ser el mismo. Si esto no ocurre el color que el sistema retina+cerebro les adjudica a los objetos es diferente. Se puede conseguir el mismo estímulo, en el triplete de conos, con luces o colores de diferente espectro.



**FIGURA 6.10.** Dos lámparas de longitudes de onda, de 640 nm y de 540 nm, ambas con un ancho espectral de 10 nm, de intensidades relativas 1.5 y 0.5, al superponerse producen una luz amarilla de intensidad relativa 1, con el mismo ancho espectral.

Si con una lámpara, cuya luz tiene un espectro que está centrado en 580 nm y tiene ancho de 10 nm (Fig.6.10), se ilumina una pantalla blanca se observa una mancha amarilla. Tomemos ahora dos lámparas de longitudes de onda, 640 nm y 540 nm, ambas con un ancho espectral de 10 nm (Fig.6.10). Si iluminamos la pantalla sin superponer sus luces, observamos dos manchas, una roja y la otra verde. Sin embargo, si superponemos los dos haces se observa una mancha de color amarillo. Esto se denomina una *coincidencia metamérica*.

Para que esta coincidencia se produzca, las intensidades de las lámparas deben ser ajustadas adecuadamente, para que las respuestas de los conos largos, medianos y cortos coincidan para los dos estímulos. Trabajando con las curvas de sensibilidad de la Fig.6.9, se puede mostrar que la intensidad relativa de las lámparas verde y roja, deben ser 0.5 y 1.5, respectivamente, para obtener una luz amarilla de intensidad relativa 1.

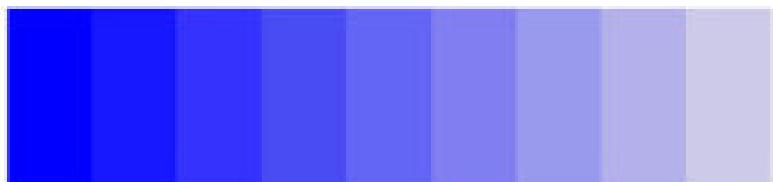
Debido a que el proceso de identificación de colores depende del cerebro y del sistema ocular de cada persona en concreto, podemos medir con toda exactitud las longitudes de onda de un haz de luz (su espectro), pero el concepto del color producido por este haz

de luz es totalmente subjetivo, dependiendo de la persona en sí. Dos personas pueden interpretar el mismo estímulo (luz con el mismo espectro e intensidad) de forma diferente, y puede haber tantas interpretaciones de un color como personas hay.

Se puede comprobar experimentalmente que la mayoría de los observadores asignan el color azul a una luz con una composición espectral similar al espectro diurno de la luz del cielo, sin nubes, que mostramos en la Fig.6.6. Este espectro puede ser interpretado como luz azul con un añadido de luz blanca, o lo que es prácticamente lo mismo, como luz azul a la que se le ha añadido su color complementario.

El cielo, entonces, no es azul en un sentido absoluto. Cuando la luz solar es dispersada por la atmósfera, de acuerdo a la ley de Rayleigh, el resultado es un espectro que no está solamente en el rango de longitudes de ondas correspondiente al azul y ni siquiera tiene su punto máximo en el azul (lo tiene en el violeta). Aunque en el espectro no hay un predominio del azul, desde el punto de vista de nuestra percepción sí hay una preponderancia. Esto es, percibimos el cielo azul a pesar de que la luz del cielo contiene luz de todas las longitudes de onda.

Cualquier fuente de luz visible puede ser considerada como una mezcla de luz blanca y luz de una sola longitud de onda que se denomina la longitud de onda dominante. Una mezcla de luz blanca con una luz monocromática de un cierto color, por ejemplo el rojo, da como resultado un rojo más claro: el rosado. El grado de *saturación* está determinado por la cantidad relativa de luz monocromática. La saturación completa se tiene cuando no hay ninguna luz blanca.



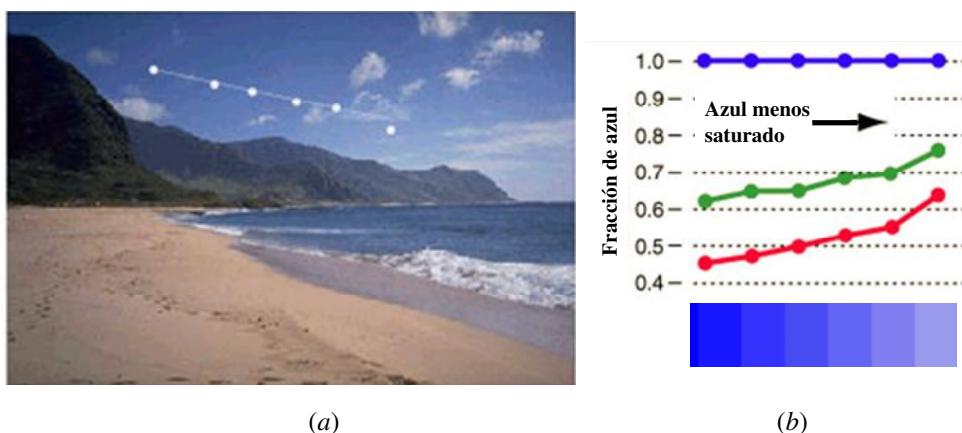
**Figura 6.11.** Diferentes grados de saturación del color azul.

En la Fig.6.11, mostramos al color azul con distintos grados de saturación, que van decreciendo desde la derecha hacia la izquierda.

La longitud de onda dominante de la luz solar dispersada, según la ley de Rayleigh y a la absorción de la atmósfera, como muestra la Fig.6.6 son las longitudes de onda que están en el entorno de 400 y 490 nm. La pureza de esta luz dispersada, alrededor del

42%, es el límite superior para el azul del cielo. Los azules de los cielos reales son menos puros.

Se pueden inspeccionar la proporción de los colores rojo, verde y azul de la luz del cielo utilizando una simple cámara digital. Esto puede dar una idea de la proporción de luz blanca, respecto del azul, en la luz dispersada por la atmósfera. La Fig.6.12a, muestra una imagen digital que tiene una porción de cielo “azul”. Los puntos blancos, superpuestos sobre esta imagen, muestran los pixeles que se eligieron para analizar su composición espectral. El último punto está fuera de la línea para evitar una nube. Existen métodos simples que permiten medir el contenido de color de cada uno de estos puntos.



**Figura 6.12.** (a) Imagen digital con una porción de cielo azul. (b) Proporción de los rojos y verdes en relación con el azul, contenidos en los cinco puntos marcados en la imagen digital.

Los resultados de estas mediciones se muestran en la Fig.6.12 b. En el gráfico se normalizó la intensidad del color azul a 1, y se expresaron el rojo y el verde como una fracción del azul. Se observa que el verde es significativamente más brillante que el rojo. Esto es consistente con la dispersión Rayleigh que tiene una dependencia con la inversa a la longitud de onda a la cuarta. Otro resultado es que el verde y el rojo, aumentan, como fracción del azul, a medida que nos acercamos hacia el horizonte, indicando con ello que el color se hace cada vez menos saturado. En la parte inferior de esta figura se muestra la disminución de la saturación. Estas mediciones coinciden con nuestra percepción, puesto que efectivamente observamos que a medida que nos acercamos a la derecha de la imagen - el horizonte - el cielo se vuelve más brillante y su azul está menos saturado o más pastel.

## Los otros colores del cielo

Hasta el capítulo 6 nos hemos dedicado casi exclusivamente a responder a la pregunta de por qué el cielo es azul. En este capítulo analizamos, en varias secciones, otros colores del cielo, en días con y sin nubes y a diferentes horas. La descripción que hacemos no agota, de ninguna manera, su imponente variedad.

### 7.1. Medición de las tonalidades de azul

El azul del aire es más o menos claro cuando se asciende a los picos más elevados. Horace Benedict de Saussure (1740-1799) inventó una manera de medir “*exactamente*”



**Figura 7.1.** Cianómetro de Saussure con una escala de 52 clases de azules

esas tonalidades de azul. Saussure, probablemente fue quien más escaló y recorrió las laderas de los Alpes hasta el punto de que se lo considera el fundador de la exploración alpina sistemática. Saussure incorporó a su pasión por la escalada de las montañas sus estudios científicos y popularizó las palabras geología y geólogo. Inventó varios instrumentos científicos que le ayudaron a dar precisión a sus observaciones. Inventó el higrómetro, un dispositivo para medir la humedad de la atmósfera, que utilizaba un

cabello humano como elemento sensible, un anemómetro para medir la velocidad del viento, termómetros especialmente diseñados para medir la temperatura en lagos profundos y el primer electrómetro para medir el grado de electrificación del aire.

Durante sus observaciones se sintió profundamente impresionado por el azul de los cielos montañosos y sus sutiles gradaciones y tonalidades. Saussure observó que “*el cielo es casi negro en aquellas elevadas regiones*”, en concordancia con la opinión de Euler y de Leonardo, y estimó que después de los 13.000 metros se alcanzaría la negrura total.

Incluyó además, en sus observaciones, mediciones del color del cielo. En 1788 publicó una descripción de lo que llamó el “*cianómetro*”, un aparato para medir el grado de intensidad del azul, y el “*diafanómetro*”, un artefacto para medir la transparencia del aire. El cianómetro de Saussure, que se muestra en la Fig. 8.1, era un dispositivo formado por una serie de piezas numeradas de color, 52 en total, que daban el patrón con el cual podía compararse el cielo observado.

Saussure creía además que “[...] *el color del cielo puede considerarse como la medida de los vapores opacos o los vahos que están suspendidas en el aire*”. Supuso que si no estuvieran presentes estos vapores, el aire sería incoloro y el cielo negro. “[...] *pero el aire no es perfectamente transparente; sus elementos siempre reflejan algunos rayos de luz y particularmente los rayos azules. Esos rayos reflejados producen el color azul del cielo*”.

## 7.2. Los colores de la puesta del Sol

En la puesta del sol, la luz directa que nos llega del mismo, atraviesa una capa de aire de gran espesor. Mientras viaja, debido a la dispersión, la luz del sol pierde los colores azul y verde. Si la atmósfera contiene solamente moléculas (aire puro) los cálculos muestran que el color que observaríamos en el ocaso sería amarillo anaranjado (Fig.7.2 a la izquierda). Los tonos profundamente rojizos de algunos atardeceres se deben a la presencia en el aire, de pequeñas partículas, llamadas aerosoles, causadas por la contaminación, incendios, tormentas de viento, etc. El tamaño diverso de estas partículas, varían entre  $10^{-2}$  y  $1\mu\text{m}$ , dan lugar a distintas composiciones espectrales de dispersión. Si el tipo de dispersión que producen es el de Rayleigh, éstas terminan por

eliminar el verde y el amarillo de la luz del sol y observamos un ocaso de color anaranjado-rojizo a muy rojizo (Fig.7.2, a la derecha).



**Figura 7.2.** Los colores de la puesta del sol. A la izquierda, la luz del sol atraviesa una atmósfera molecular, menos contaminada y el color del ocaso es amarillo anaranjado. A la derecha, la presencia de aerosoles en la atmósfera provoca un color rojizo.

Al mediodía la luz que nos llega del sol atraviesa una capa de atmósfera menos espesa y la dispersión acumulada es mucho menor. Dispersa, sin embargo, más el azul que los otros colores y la luz que nos llega tiene un color levemente amarillo. Se lo observa rodeado de una aureola blanca que se debe a la dispersión Mie. Más adelante vamos a volver sobre este punto.

### 7.3. El color del cielo en un día sin nubes

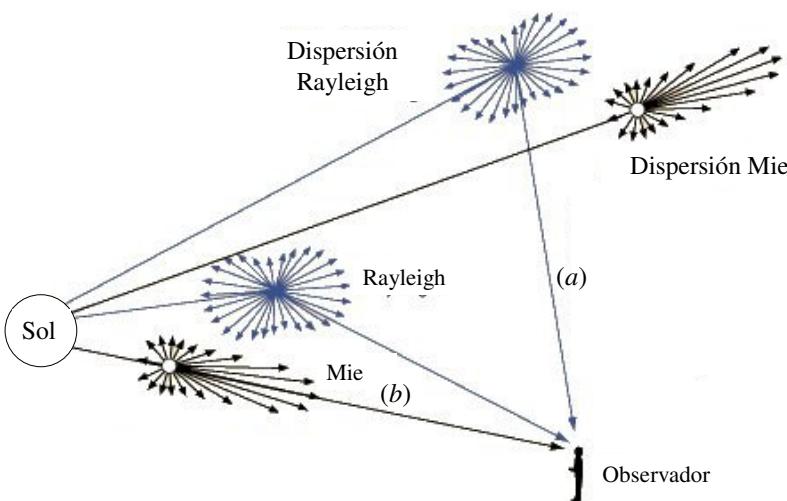
Las características principales de un día sin nubes son:

- a. La intensidad de la luz dispersada por el cielo incrementa rápidamente cerca del sol y al mismo tiempo resulta más brillante, esto es, se hace más blanco.
- b. A ángulos de  $\pm 90^\circ$  del sol, el cielo es usualmente más oscuro y el color azul está más saturado.
- c. La intensidad de la luz del cielo incrementa hacia el horizonte, su azul se vuelve menos saturado y resulta mucho más brillante o sea más blanco.



**Figura 7.3.** Debido a la fuerte dependencia direccional de la dispersión Mie, el haz de luz, en la dirección que viene del sol, forma un cono de abertura muy pequeña y como tiene una débil dependencia con la longitud de onda se produce el emblanquecimiento del cielo en las cercanías del sol.

Estos tres efectos se combinan para dar el color del cielo. Además, la cantidad de aerosoles en la atmósfera influye en el resultado, por lo que es imposible encontrar dos días con una distribución de color idéntico del cielo.



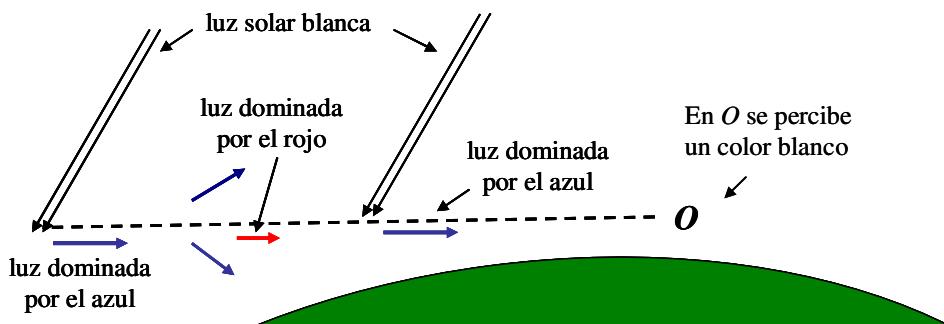
**Figura 7.4.** (a) La baja intensidad del color del cielo en las direcciones que están a  $90^\circ$  del sol es porque la dispersión Rayleigh, en la dirección transversal, es la mitad que en las direcciones para adelante y para atrás. Además, el scattering Mie, dispersa muy poca luz en esa dirección. (b) La dispersión Mie provoca el emblanquecimiento del cielo alrededor del sol.

El primer efecto se debe a la dispersión por aerosoles. La fuerte dependencia direccional de la dispersión Mie, en la dirección que viene del sol (Fig.7.4b), forma un cono de apertura muy pequeña y como tiene una débil dependencia con la longitud de onda se produce el emblanquecimiento del cielo en las cercanías del sol como se muestra en la foto de la Fig7.3. En ausencia de aerosoles, la dispersión por la atmósfera es solamente Rayleigh y el sol en el céntro tendría un color amarillo.

La baja intensidad del color del cielo en las direcciones que están a  $90^\circ$  del sol se explica porque la dispersión Rayleigh, en la dirección transversal, es la mitad que en las direcciones para adelante y para atrás (ver Fig.7.4a). Además, el scattering Mie, dispersa muy poca luz en esa dirección. Por lo tanto, en esa dirección se dispersa menos luz, pero es azul en su mayor proporción, por ese motivo el azul del cielo está más saturado.

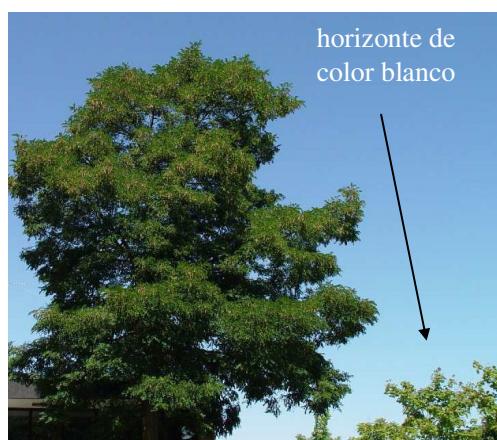
La explicación del color blanco del horizonte es la siguiente: la luz que proviene del horizonte recorre un largo camino y su dispersión lateral por dispersión Rayleigh le hace perder el color azul. Se podría esperar que esto haga que los objetos lejanos parezcan más rojos de lo que son en realidad. La razón por la que el horizonte del cielo parece blanco en circunstancias normales estriba en que el aire que está entre nosotros y el horizonte introduce en la línea visual cierta cantidad de luz azul. La combinación de longitudes de onda largas (rojas) que vienen del horizonte lejano y las cortas del horizonte cercano (azules) es la causa de que el horizonte se vea blanco. Los partidarios

de esta explicación sostienen que el predominio de longitudes de onda largas frente a las cortas, en la luz procedente del horizonte lejano, se hace evidente durante un eclipse solar total, momento en que el horizonte se torna anaranjado. En el momento del eclipse total, cuando nos hallamos justo bajo la sombra de la Luna, la atmósfera que se encuentra inmediatamente alrededor de nosotros no está iluminada por el Sol, y por lo tanto no recibimos suficiente luz azul dispersada por esta parte de la atmósfera, como para que haga que el lejano horizonte rosado se muestre de color blanco.



**Figura 7.5.** Explicación del color blanco del horizonte.

Que el horizonte aparezca más brillante que el cenit se debe también a que en la dirección hacia el horizonte hay una cantidad mayor de aire. Se dispersa mucha más luz desde el horizonte que desde cualquier otra parte del cielo, porque en esa dirección se encuentran muchas más moléculas que en cualquier otra. Por lo tanto, incluso en ausencia de partículas muy pequeñas como las que generan la neblina y la polución, la atmósfera siempre es más luminosa en la dirección del horizonte. Por el contrario, la parte menos brillante del cielo es el cenit, dado que la cantidad de atmósfera en esta dirección es menor que en cualquier otra.



**Figura 7.6.** El color blanco del horizonte.

La otra explicación del color blanco del horizonte sostiene que se debe a la dispersión múltiple, esto es, porque la luz que nos llega desde el horizonte, es dispersada por más

de una molécula. Como resultado, los rayos de luz que provienen, o parecen provenir, de esa zona tienen una mezcla de colores que converge hacia el color blanco. Todavía no hay mediciones o simulaciones concluyentes que determinen cual de estas explicaciones es la más correcta. Es probable que sea una mezcla de las dos.

Visto desde un avión, o desde la cima de una montaña elevada, el cenit es sensiblemente más azul, aunque mucho menos brillante, que la atmósfera que está sobre el nivel del mar. A medida que aumentamos la altitud, la atmósfera se hace menos brillante hasta que alcanzamos el borde de la atmósfera, lugar en que el cielo se torna completamente oscuro. De hecho, un avión es el mejor lugar para observar la variación en el color y en el brillo de un cielo despejado.

#### **7.4. La perspectiva visual**

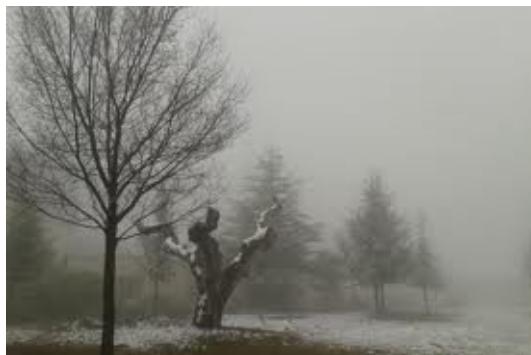
La perspectiva aérea o perspectiva atmosférica se refiere al efecto que la atmósfera tiene sobre la apariencia de un objeto cuando es mirado desde la distancia. Como lo notó Da Vinci (Capítulo1) mientras más lejos está un objeto se lo ve más azul. El desplazamiento hacia el azul es más notable en los objetos oscuros o en los que están en la sombra. Esto es así, debido a que la dispersión agrega y/o elimina luz, y también porque estos dos efectos en principio se contrarrestan entre sí. La luz blanca que refleja la parte superior de una montaña, tiene algo menos de azul por que el rayo, antes de reflejarse, ya perdió por dispersión algo de ese color, pero la luz añadida por la dispersión de la luz en la atmósfera, que está entre la cima de la montaña y nuestros ojos, agrega un poco más de azul que otros colores. El resultado es que a esa montaña la vemos con un tinte azulado. La atmósfera, entre la montaña y el observador, agrega más azul mientras más lejos esté la montaña.

Si la luz se refleja o nos viene de una superficie oscura de la montaña, como el de un acantilado, al que la misma montaña le hace sombra, es muy débil, de modo que lo que percibimos es la sombra (la falta de luz) más la luz azul dispersada por la atmósfera que está entre esa zona de la montaña y nuestro ojo. El acantilado aparecerá azul cuando se lo ve desde lejos. En este caso, estamos observando el color de la atmósfera sobre un fondo oscuro, que es esencialmente lo mismo que el color del cielo visto contra el fondo negro del espacio.

Para los objetos lejanos que son brillantes, el cambio no es hacia el azul sino hacia el amarillo. Esto es porque la atenuación del azul de los rayos, antes de ser reflejados es

más fuerte que el azul que le agrega la atmósfera entre el objeto brillante y nuestros ojos. La luz que nos llega tiene menos azul y se lo observa algo amarillo.

En los días brumosos, cuando la cantidad de aerosoles en el aire es mayor, los objetos comienzan a perder color y adquieren un matiz más gris como se muestra en la Fig.7.7. Los aerosoles grandes, dispersan hacia nosotros la luz de manera no selectiva y al mismo tiempo produce un debilitamiento de la luz que hace que veamos de color gris a todos los objetos lejanos.



**Figura 7.7.** En los días brumosos todos los objetos pierden color y adquieren un matiz de gris

## 7.5. El color de las nubes

Las nubes están formadas por pequeñas gotas de agua cuyos diámetros están en el rango de 2 a 20  $\mu m$ , esto es, son mucho mayores que la longitud de onda de la luz visible. Para analizar la dispersión de la luz visible por una nube, o por las partículas que forman la nube, debemos utilizar, por lo tanto, la dispersión Mie. En esta teoría la dispersión no es selectiva con la frecuencia, esto es, dispersa a todas las longitudes de onda de la misma manera. Si la luz que incide sobre la nube es blanca la luz reflejada es blanca. Cuando observamos la superficie iluminada de la nube la vemos blanca. Cuando una nube está encima de nosotros, lo que observamos es la luz que se transmite a través de la nube. Si la nube es de poco espesor la seguimos viendo blanca. Si el espesor de la nube va aumentando, debido a la mayor atenuación del rayo – por absorción y dispersión – la comenzamos a ver de color gris claro y si su espesor es muy grande (de más de 1 Km) adquiere un color oscuro. La luz transmitida a través de la nube sigue siendo blanca, pero su brillo es muy bajo (menor que  $0.25 \text{ cd/m}^2$ ), de modo que la luz es detectada solamente por las células tipo bastón de la retina que juegan un papel muy pequeño en la visión del color. La información que lleva al cerebro, procedente de las células bastón, es transformada en una escala de grises que van desde al blanco hasta el muy oscuro según sea el brillo de la nube.

Son muy frecuentes, al atardecer o al amanecer, las nubes de color amarillo-rojizo. Es porque reflejan la luz roja que le está llegando directamente del sol. La nube, como refleja de la misma manera todas las longitudes de ondas, tiene el color de la luz con la cual se la ilumina, blanca si se la ilumina con luz blanca y roja si se la ilumina con luz roja.



**Figura 7.8.** Nubes grises y oscuras a la izquierda y nubes de color púrpura a la derecha.

En el atardecer, del lado este se suelen observar a veces nubes de color púrpura. Sobre estas nubes llegan rayos del sol que viajan en la parte más baja de la atmósfera, pierden el azul, y llegan de color rojo cuando inciden sobre la nube. Además de estos rayos pueden llegar sobre la nube los rayos azules dispersados por la capa de ozono que está entre los 15000 y 25000 Km. La superposición de estos dos colores da el color púrpura.

## 7.6. La Tierra vista desde el espacio exterior

J. A. Nollet y J. H. Lambert conjeturaban, por separado, en el año 1760, que si, de la blanca luz que llega del sol, la Tierra dispersa más la parte azul que los otros colores, el cielo debía verse azul. Si así fuera, deducía Nollet, también desde el espacio exterior, por ejemplo desde la luna, se vería a la Tierra de color azul. En esa época Nollet no pudo verificar experimentalmente su suposición. Ahora es muy fácil ver una foto de la tierra tomada desde el espacio exterior. ¿De qué color se ve a la Tierra?

La Tierra efectivamente se ve azul desde el espacio, pero la especulación de Nollet y Lambert no es totalmente correcta. El motivo por el cual se la ve azul es porque el agua absorbe la luz roja, por lo tanto remite preferentemente luz azul, en la reflexión desde su superficie y desde las impurezas u otros objetos que están en su interior. Las algas se

observan de un color verde. El 70% de la superficie terrestre es agua (mares y océanos) y por eso a la Tierra se la ve azul.



**Figura 7.9.** La Tierra vista desde el espacio exterior.

¿Qué pasa con la luz azul dispersada por la atmósfera? La luz azul dispersada por el aire se mezcla con la luz reflejada por los continentes, selvas, desiertos y el mar, pero no aporta mucho al color de la Tierra, aunque le da un pequeño tinte azulado. La luminancia de la superficie terrestre es comparable a la luminancia de la atmósfera, por ese motivo, desde el espacio exterior la atmósfera no apantalla a los objetos que están por debajo. Es también la causa por la cual desde la tierra podemos observar la luna que tiene una luminancia comparable, aunque inferior, a la luminancia de la atmósfera. El 30% de la luz que incide sobre la Tierra se refleja y vuelve al espacio, en promedio, el 6% es reflejado por la atmósfera, el 5% por la superficie terrestre y el 19% por las nubes. El alto porcentaje de luz reflejada por las nubes muestra su importancia para regular la temperatura terrestre. El hielo y la nieve también reflejan bastante: ocho veces más que las selvas y los océanos.

## 7.7. El color del ópalo

La piedra preciosa llamada ópalo es una forma amorfa del silicio que se compone de esferas de sílice submicroscópicas densamente agrupadas. Los espacios entre las esferas de sílice contienen agua o silicio rico en agua. Estas inhomogeneidades cuando son más pequeñas que la longitud de onda dispersan la luz de acuerdo a la ley de Rayleigh y dan lugar al color azulado en la luz reflejada, mientras que la luz transmitida se ve con un tinte amarillo.

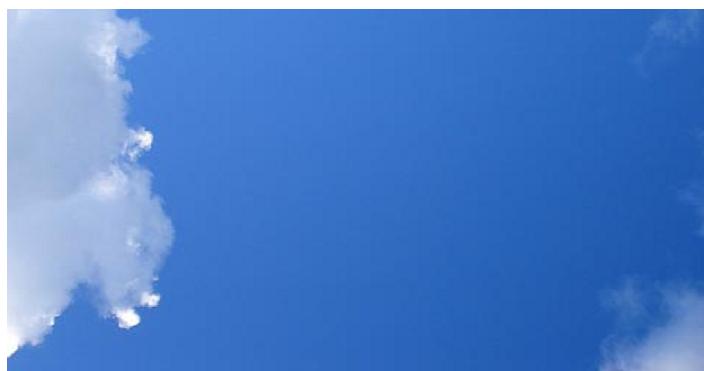
Cristales de opalescencia turbia o lechosa artificiales se obtienen agregando fluoruros, fosfato de calcio (ceniza de hueso) o dióxido de estaño a la carga de fundición del silicio. Los pequeños cristales de tamaño menor que la longitud de onda, se distribuyen finamente en el vidrio produciendo una dispersión Rayleigh. El cristal de criolita, que se muestra en la Fig.7.10, está iluminado desde la izquierda y se ve azulado ante un fondo oscuro y naranja-amarillo (la luz transmitida) ante un fondo blanco o un fondo que refleja la luz.



**Figura 7. 10.** El ópalo de la figura está iluminado con luz blanca que le llega desde la izquierda. La parte del ópalo que tiene un fondo negro se ve azulado y la parte que está sobre el fondo blanco se ve de un color amarillo-anaranjado que es la luz que refleja la superficie blanca y vuelve a atravesar el ópalo. Esta foto es muy interesante porque explica el color de la atmósfera. Vista desde la Tierra, cuando tiene atrás el negro del espacio vacío, la vemos azul, pero vista desde el espacio exterior vemos la superficie iluminada de la Tierra que se refleja hacia el espacio exterior.

## 7.8. Las nubes limpian el cielo

Si observamos el cielo en las proximidades de una gran nube cúmulos, se lo ve más azul. Se nota un hermoso azul en contra de las nubes blancas como se muestra en la Fig. 7.11. Esto se debe a que estas nubes cúmulos han limpiado la atmósfera en el curso de



**Figura 7.11.** El azul del cielo en las proximidades de una nube.

su formación. ¿Como se produce este proceso de limpieza? Las nubes blancas son gotas de agua - no es vapor de agua - y estas pequeñas gotas no se pueden formar si no hay partículas de polvo: tiene que haber partículas de alguna clase, pueden ser muy pequeñas o un poco más grandes. Estas partículas se llaman “núcleos de condensación”.

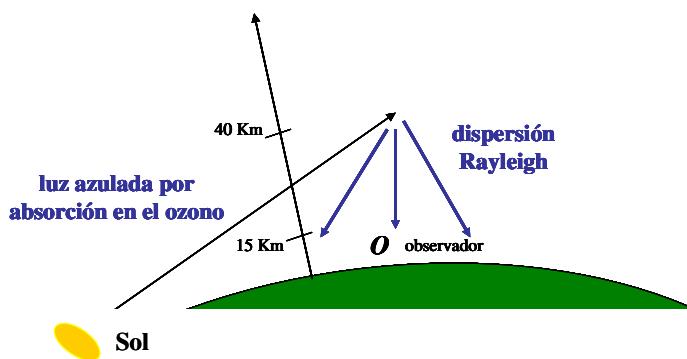
Los núcleos de condensación proporcionan superficies sobre las cuales el vapor de agua puede condensarse y crear las gotas que forman las nubes. Estos núcleos son de aproximadamente de 0.2 a 10.0  $\mu\text{m}$  de diámetro y son partículas lo suficientemente livianas para poder permanecer en suspensión en el aire. Los núcleos de condensación provienen de una variedad de fuentes, incluyendo polvo, polen, humo, sal del mar, etc.

Si no hubiera núcleos de condensación en el aire no habría nubes ni lluvia. Obsérvese cómo tratando de explicar el azul del cielo pasamos a la causa de la lluvia. Una cosa lleva a la otra. Esto es la esencia de la ciencia. Conclusión: al formarse una nube la atmósfera se limpia y el cielo es más azul.

### 7.9. El ozono

La dispersión de la luz solar por la mayoría de los constituyentes moleculares de la atmósfera es despreciable comparada con los constituyentes normales de la atmósfera. Una excepción es el ozono. El ozono se forma de manera natural en la atmósfera superior como resultado de la interacción de la radiación ultravioleta procedente del sol y el oxígeno molecular ( $\text{O}_2$ ), que se transforma en  $\text{O}_3$ , (ozono) como resultado de esa interacción. Este proceso no se produce en la atmósfera inferior porque el ozono absorbe la mayor parte de la luz ultravioleta antes de llegar a la Tierra.

El ozono absorbe muy fuertemente a la luz, en la región del espectro que se extiende entre 200 y 300  $\text{nm}$  (ultravioleta), con un máximo en 255  $\text{nm}$ . El ozono que se distribuye entre 15 y 40  $\text{Km}$  evita, por lo tanto, que la radiación ultravioleta (UV) alcance el nivel del suelo.

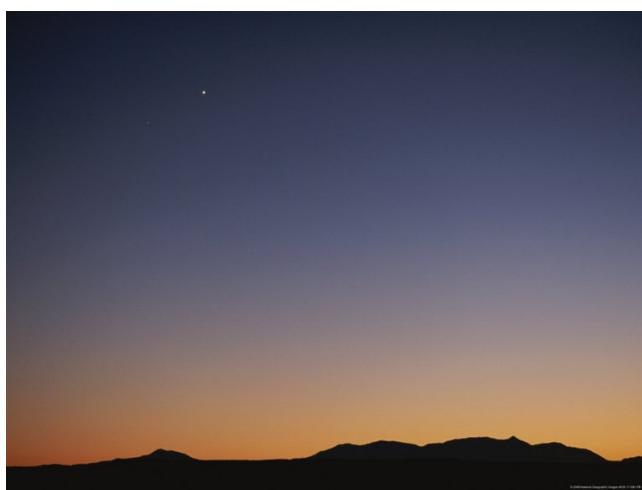


**Figura 7.12.** El azul del cielo, en el cenit, después de la puesta del sol.

Lo que es menos conocido, sin embargo, es que la banda de absorción del  $\text{O}_3$  en la zona del rojo-anaranjado, cerca de los 600  $\text{nm}$ , hace que tenga una influencia importante en el color del cielo, cuando el sol está bajo o justo debajo del horizonte.

Debido a esta absorción de la luz roja y naranja, el gas de ozono puro adquiere un color azul pálido en el laboratorio.

A medida que el Sol se acerca al horizonte la luz entra en un ángulo rasante y atraviesa una gran distancia en las capas de ozono, como se muestra en la Fig.7.12. El ozono absorbe las componentes amarillo anaranjado de la luz del sol y esta se torna de color azul. Esta luz azul que se propaga es dispersada, a su vez, por las propias moléculas de ozono, e ingresan hacia la superficie de la Tierra. Esto hace que se vea el cielo de un intenso color azul, como se muestra en la Fig.7.13.



**Figura 7.13.** El azul del cielo después de la puesta del sol.

El color en el cenit de un cielo claro, cuando se pone el Sol, es mucho más azul que el que puede ser alcanzado en la ausencia de la capa de ozono, como lo indican modelos numéricos muy simples que demuestran que, en la ausencia de la capa de ozono, el cielo del cenit tendría un color pálido gris-amarillo en el atardecer.

### 7.10. El cielo de la noche

Si nos preguntan de qué color es el cielo nocturno: es normal contestar: “negro, por supuesto”. Sin embargo, eso no es realmente correcto. Nosotros lo vemos negro, porque no hay suficiente luz para estimular los conos sensibles al color de nuestros ojos. Sin embargo, hay luz en el cielo nocturno y tiene color. Lejos de las luces de la ciudad, el cielo nocturno iluminado por la luz de la luna es de un color azul, similar al cielo iluminado por el sol durante el día, aunque con muy poco brillo.

Cuando se pone el sol, la luz del sol no ilumina más la atmósfera y el cielo se pone oscuro. Pero ¿qué pasa si aparece la luna llena cuando el sol se pone? El brillo de la luna, que refleja la luz del sol, es muy débil, del orden de la millonésima parte del brillo del sol. Con todo, esa poca luz que viene de la luna también es dispersada por la

atmósfera de la misma manera que la luz del sol. Por lo tanto, en una noche de luna llena, el cielo de la noche también tiene que ser azul, pero sin el brillo que se necesita para estimular nuestra visión del color. En la foto de la Fig.7.14, sin embargo, el cielo nocturno aparece azul, similar al color del cielo diurno. Pero, las rayas de las estrellas son la mejor prueba de que esta foto ha sido tomada con una exposición del orden de varios minutos. La luna llena, que no se muestra en la foto, está a la izquierda.



**Figura 7.14.** Foto con exposición, del cielo nocturno.

Terminamos aquí la aventura, en la que nos hemos embarcado, para intentar explicar algunos de los colores del cielo.



# Bibliografía

## Capítulo 1

Aristóteles, *Física*, traducida por Marcelo D. Boeri. Editorial Biblos, Buenos Aires, 1993.

Aristóteles, *Obras completas*, traducidas por Patricio de Azcárate. Ediciones Anaconda, Buenos Aires, 1947.

Barasch M. *Light and Color in the Italian Renaissance Theory of Art*. New York University Press, Nueva York, 1978.

Benson J.L. en *Greek Color Theory and the Four Elements*, Chapter 2: *Greek color theory*. University of Massachusetts-Amherst Press, Amherst Massachusetts, 2007.

Canto-Sperber, M. Barnes, J. Brisson, L. Brunschwig, J. Vlastos, G. *Filosofía griega: de Tales a Aristóteles*, traductor: Aguado, A. Editorial Docencia, Buenos Aires, 2000.

Da Vinci L. *The Codex Leicester-Notebokk of a Genius*, Powerhouse Publishing, Sidney, 2000.

Hoeppé G. *Why the Sky Is Blue*. Princeton University Press, 2007.

Pesic P. *El cielo en una botella*, Editorial Gedisa S. A., Barcelona, 2007.

Prieto Pérez J. L. *Platón y el Timeo*, Biblioteca Digital de Fundoro, Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, 2004.

Ristori d'Arezzo *La composizione del mondo*, compilación de Alberto Morino. Fondazione Pietro Bembo, Parma, 1997.

Ronchi V. *The Nature of Light: An Historical Survey*, Harvard University Press, Cambridge, 1970.

Turner H.H. *Science in Medieval Islam*. University of Texas Press, Austin, 1995.

Zemplén G. A. *The History of Vision, Colour, & Light Theories*. Bern Studies in the History and Philosophy of Science, Bern, 2005.

## Capítulo 2

Afanasyev Y. D. Andrews G. T. y Deacon C. G. "Measuring soap bubble thickness with color matching". *American Journal of Physics*, **79**, 1079-1085, 2011.

Cantor, G. *Optics after Newton: Theories of light in Britain and Ireland*. Manchester University Press, Manchester, 1983.

Descartes R. *Discours de la méthode* (1637). Éditorial Hatier, Paris, 1999.

Hoeppé G. *Why the Sky Is Blue*. Princeton University Press, 2007.

Lindberg, D. C. *Los inicios de la ciencia occidental: la tradición científica europea en el contexto filosófico, religioso e institucional (desde el 600 a. C. hasta 1450)*. Ediciones Paidós Ibérica, 2002.

Newton I. *Mathematical Principles of Natural Philosophy*. University of California Press, Berkeley, 1999.

Newton I. *Optiks*. Dover, Nueva York, 1952.

Pesic P. *El cielo en una botella*, Editorial Gedisa S. A., Barcelona, 2007.

Ronchi V. *The Nature of Light: An Historical Survey*, Harvard University Press, Cambridge, 1970.

Voltaire, *The Elements of Sir Isaac Newton's Philosophy*. Frank Cass and Company, Londres, 1967

Zemplén G. A. *The History of Vision, Colour, & Light Theories*. Bern Studies in the History and Philosophy of Science, Bern, 2005.

### Capítulo 3

Cantor, G. *Optics after Newton: Theories of light in Britain and Ireland*. Manchester University Press, Manchester, 1983.

Pesic P. *El cielo en una botella*, Editorial Gedisa S. A., Barcelona, 2007.

Hoeppel G. *Why the Sky Is Blue*. Princeton University Press, 2007.

Ronchi V. *The Nature of Light: An Historical Survey*, Harvard University Press, Cambridge, 1970.

Zemplén G. A. *The History of Vision, Colour, & Light Theories*. Bern Studies in the History and Philosophy of Science, Bern, 2005.

Cantor, G. *Optics after Newton: Theories of light in Britain and Ireland*. Manchester University Press, Manchester, 1983.

Pye D. *Polarised Light in Science and Nature*. Institute of Physics Publishing, Bristol, Philadelphia, 2001.

Young T. *On the Theory of Light and Colors*, en *Sources of Color Science*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1970.

Buchwald J. Z. *The rise of the Wave Theory of Light*. The University of Chicago Press, 1984.

Cristian Huygens *Treatise on Light*, Dover, Nueva York, 1962.

Euler L. *Letters of Euler on Different Subjects in Natural Philosophy, Adressed to a german Princess*. Harper, Nueva York, 1837.

Fresnel A. *Oeuvres complètes*, (Imprimerie impériale, Paris, 1866), Traducción inglesa por H. Crew, *The Wave Theory of Light*. American Book Company, New York, 1900.

Harman P. M. *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell*. Cambridge University Press, Cambridge, 1995

Young T. "Experiments and calculations relative to physical optics". *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 54 ,1-16, 1804.

## Capítulo 4

Bohren C. F. *Clouds in a Glass of Beer: Simple Experiments in Atmospheric Physics*. Dover Publications, 2001.

Govi G. “De la polarization de la lumière par diffusion”. *Comptes rendues hebdomadaires des séances de l'Académie de sciences*, **51**, 360-361, 1860.

Hoeppé G. *Why the Sky Is Blue*. Princeton University Press, 2007.

Lindsay R. B. *Lord Rayleigh: The Man and His Work*, Pergamon Press, Oxford, 1970.

Pesic P. “The Sky is Falling: Newton’s Droplets, Clausius’s Bubbles, and Tyndall’s “Sky Matter”. *European Journal of Physics*, **26**, 189-193, 2005.

Pesic P. *El cielo en una botella*, Editorial Gedisa S. A., Barcelona, 2007.

Pye D. *Polarised Light in Science and Nature*. Institute of Physics Publishing, Bristol, Philadelphia, 2001.

Rayleigh L. “On the scattering of light by small particles”. *Philosophical Magazine*, **41**, 447–451, 1871

Rayleigh L. “On the Transmission of Light through an Atmosphere containing Small Particles in Suspension, and on the Origin of the Blue Sky”. *Philosophical Magazine*, **47**, 375–384, 1899.

Rosenberg G. V. “Light scattering in the earth's atmosphere”. *Soviet Physics Uspekhi*, **3**, 346-371, 1960.

Sawyer P. L. *Ruskin and Tyndall: The Poetry of Matter and the Poetry of Spirit*, en *Victorian Science and Victorian Values: Literary Perspectives*. Rutgers University Press, New Brunswick, Nueva Jersey, 1985.

Smith G. S. “The polarization of skylight: An example from nature”. *American Journal of Physics*, **75**, 25-34, 2007.

Sobel'man I.I. “On the theory of Light scattering in gases”. *Physics-Uspekhi*, **45**, 75-80, 2002.

Strutt J.W. (Lord Rayleigh) “On the light from the sky, its polarisation and colour”. *Philosophical Magazine*, **41**, 274-279, 1871.

Tyndall J. “On the Blue Colour of the Sky, the Polarization of Skylight, and on the Polarization of Light by Cloudy Matter Generally”. *Proceedings of the Royal Society of London*, **17**, 223-233, 1869.

## Capítulo 5

Andrews, T. “On the continuity of the gaseous and liquid states of matter”. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, London, **159**, 575-590, 1869.

Bohren, C. F. (Ed.) *Selected Papers on Scattering in the Atmosphere*. Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press, 1989.

Brubacher L. "An experiment to measure Avogadro's constant. Repeating JeanPerrin's confirmation of Einstein's Brownian motion equation". *Chemical News*, **14**, 56-65, 2006.

Einstein A. "The Theory of the Opalescence of Homogeneous Fluids and Liquide Mixtures near the Critical State", *Annalen der Physik*, **25**, 205-226, 1910.

Feynman R. Leighton R. and Sands M., *The Physics Lectures on Physics*, Vol.1, Addison Wesley, Massachusetts, 1966.

Hoepppe G. *Why the Sky Is Blue*. Princeton University Press, 2007.

McCartney E. *Optics of the Atmosphere:Scattering by Molecules and Particles*. J. Wiley and Sons, New York, 1976.

Newburgh R. Peidle J. y Rueckner W. "Einstein, Perrin, and the reality of atoms: 1905 revisited". *American Journal of Physics*, **74**, 554-563, 2006.

Nott M. "Molecular reality: the contributions of Brown, Einstein and Perrin". *School Science Review*, **86**, 39 -46, 2005.

Ogborn J. Collins S. y Brown M. "Randomness at the root of things: Random walks". *Physics Education*, **38**, 391-397, 2003.

Pesic P. *El cielo en una botella*, Editorial Gedisa S. A., Barcelona, 2007.

Psillos S. "Moving Molecules Above the Scientific Horizon: On Perrin's Case for Realism", *Journal for General Philosophy of Science*, **42**, 339–363, 2011.

Rojo A. G. y P. R. Berman, "Rayleigh scattering revisited: from gases to crystals". *American Journal of Physics*, **78**, 94-101, 2010.

Rosenberg G. V. "Light scattering in the earth's atmosphere". *Soviet Physics Uspekhi*, **3**, 346-371, 1960.

Seneta E. *Marian Smoluchowski*, en *Statisticians of the Centuries*. Ed. C. C. Heyde and E. Seneta , Springer, New York, 2001.

Sobel'man I.I. "On the theory of Light scattering in gases". *Physics-Uspekhi*, **45**, 75-80, 2002.

Zimm B.H. "Molecular Theory of the Scattering of Light in Fluids". *Journal of Chemical Physics*, **13**, 141-152, 1945.

## Capítulo 6

Pesic P. *El cielo en una botella*, Editorial Gedisa S. A., Barcelona, 2007.

Hoepppe G. *Why the Sky Is Blue*. Princeton University Press, 2007.

Bohren C. F. Fraser, A. B., "Colors of the sky". *The Physics Teacher*, **267**, 231-240, 1985.

Minnaert M. *The Nature of Light and Colour in the Open Air*. Dover Publications, New York, 1954.

Narasimhan S. G. y Nayar S, K., "Vision and the Atmosphere". *International Journal of Computer Vision* **48**, 233–254, 2002.

Land E.H. "Experiments in Color Vision". *Scientific American*, **200**, 84-99, 1959

Mollon J. D. *The origins of modern color science*. In Shevell, S. (Ed) *Color Science*. Optical Society of America, Washington, 2003.

Mollon J. D. *Thomas Young and the trichromatic theory of colour vision*. En Mollon, J. D. Pokorny, J. and Knoblauch, K. (Eds) *Normal and Defective Colour Vision*. Oxford University Press, Oxford, pages xix-xxxiii, 2003.

Neuberger, H. *Introduction to Physical Meteorology*. University Park, PA: College of Mineral Industries, Pennsylvania State University, 1951.

Pedrotti, L.S. *Optics and Vision*. Prentice Hall, 1998.

Raman C. V. *The Physiology of Vision*. The Indian Academy of Sciences, Bangalore, 1968.

Smith G. S. “Human color vision and the unsaturated blue color of the daytime sky”. *American Journal of Physics*, **73**, 590-597, 2005.

## Capítulo 7

Bohren C. F. Fraser, A. B., “Colors of the sky”. *The Physics Teacher*, **267**, 231-240, 1985.

de Saussure H. “Description d’un cyanomètre ou d’un appareil destiné à mesurer l’intensité de la couleur bleue du ciel”. *Mémoire della R. Accademia delle scienze di Torino* **4**, 409-424, 1788.

Minnaert M. *The Nature of Light and Colour in the Open Air*. Dover Publications, New York, 1954.

Narasimhan S. G. y Nayar S. K., “Vision and the Atmosphere”. *International Journal of Computer Vision* **48**, 233–254, 2002.

Nishita T. Dobashi Y. Kaneda K. y Yamashita H. “Display method of sky color taking into account multiple scattering”. *Pacific Graphics’96* , 117–132, 1996.

Pesic P. *El cielo en una botella*, Editorial Gedisa S. A., Barcelona, 2007.

Preetham A. J. *Modeling skylight and aerial perspective*, en ACM SIGGRAPH 2003 Course Notes, ATI Research, 2003.

Se Yuen Mak “Demonstrating Colors of Sky and Sunset”. *Physics Teacher*, **32**, 420-421, 1994.

Shaw J.A. “What color is the night sky?”. *Optics & Photonics News*, **54**, 54-55, 1996.

Young M. L. “Blue Skies, Coffee Creamer, and Rayleigh Scattering”. *Physics Teacher*, **48**, 300-307, 2010.